Lehrstuhl für Angewandte Physiologie der Universität Tübingen
Professor Dr. med. E. Betz

# Die Wirkung von akuten Azidosen und Alkalosen auf die corticale cerebrale Durchblutung

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

**Dieter Heuser**
aus Kassel

1969

Lehrstuhl für Angewandte Physiologie der Universität Tübingen
Professor Dr. med. E. Betz

# Die Wirkung von akuten Azidosen und Alkalosen auf die corticale cerebrale Durchblutung

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von
**Dieter Heuser**
aus Kassel

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. med. J. Hirschmann

1. Berichterstatter: Professor Dr. med. E. Betz

2. Berichterstatter: Professor Dr. med. W. Kaufmann

Meiner Mutter gewidmet

Seiten

I Inhaltsverzeichnis: 2

II Verzeichnis der akademischen Lehrer 3

III Einleitung 4

IV Beschreibung der Methoden zur Messung

a) der corticalen Gehirndurchblutung 7

b) des extracellulären pH 11

c) des corticalen $P_{CO_2}$ 12

d) des endexspiratorischen $CO_2$-Gehaltes 12

e) des arteriellen Blutdrucks 13

V Operationstechnik und Versuchsanordnung 14

VI Versuchsergebnisse bei

a) Alkalose des Blutes nach Injektion von Natriumbikarbonat 16

b) Azidose des Blutes durch Injektion von 1/3 n Salzsäure 18

VII Diskussion der Ergebnisse 20

VIII Zusammenfassung 24

IX Abbildungen 25 - 36

X Legenden zu den Tabellen I - XXV 37

XI Tabellen I - XXV 38 - 62

XII Literaturverzeichnis 63 - 74

XIII Nachwort 75

Verzeichnis der akademischen Lehrer

a) Im vorklinischen Teil des Studiums:

Brück, Dimroth, Drawert, Golenhofen, Hensel, Hohorst, Karlson, Mahr, Mattes, Petry, Rohen, Seidel, Spiegelberg, Walcher, Wendt, Witzel, Zilliken.

b) Im klinischen Teil des Studiums:

Beckmann, Berendes, Betz, Bommer, Buchholz, Braun-Falco, du Mesnil de Rochemont, Exner, Gedigk, Hamm, Hardewig, Herrmann, Heuser, Hildebrandt, Jacob, Knauff, Lang, Linneweh, Löhr, Lübbers, Mann, Martini, Marx, Neubauer, Pots, Rodeck, Rohen, Sauer, Schmidt, Schleyer, Schmitz-Moormann, Schwaiger, Siegert, Siess, Straub, Streicher, Strohmeyer, Würterle.

## Einleitung

Änderungen der Gehirndurchblutung bei intravenöser Applikation von Säuren und Basen konnten bisher schon von mehreren Autoren beobachtet werden:

LUBIN und PRICE (1942) registrierten photographisch bei Katzen Weitenänderungen der Piagefäße. Sie fanden bei Infusion von 0,1 n HCl in 15 von 2o Fällen eine Vasodilatation, bei 5 Katzen keine Änderung der Durchblutung. Bei intravenöser Gabe von 2,0 n $Na_2CO_3$ beobachteten sie in 3o von 51 Fällen eine Vasokonstriktion, bei 9 Tieren eine Dilatation und bei 12 Katzen keine Änderung der Gefäßweite.

GEIGER und MAGNES (1947) sahen im perfundierten Katzengehirn eine Durchblutungserhöhung nach Milchsäureinjektion, eine Verminderung durch Bikarbonatinfusion.

Nach GEIGER (1958) korrellierte eine steigende H-Ionen-Konzentration im Perfusionsblut mit einer Abnahme des Gehirngefäßwiderstandes.

SCHIEVE und WILSON (1952) kamen aufgrund ihrer Experimente zu dem Schluß, daß eine Vermehrung der H-Ionen-Konzentration im Blut eine Konstriktion, eine Alkalisierung des Blutes eine Vasodilatation der Gehirngefäße verursache.

SOKOLOFF (1958) diskutierte ebenfalls eine Durchblutungsänderung nach intravenöser Gabe von Säuren und Basen, ließ jedoch die Frage offen, ob die erzielten Effekte direkt durch Änderung der H-Ionen-Konzentration oder

sekundär durch die veränderte $CO_2$-Spannung verursacht wurden.

LAMBERTSEN und Mitarbeiter (1961) fanden eine direkte quantitative Beziehung der Gehirndurchblutung mit den Änderungen des Blut-$CO_2$, unbeeinflußt von Änderungen des nicht $CO_2$-bedingten Blut-pH. Sie konnten aber nicht erklären, weshalb bei metabolischer Azidose der Gefäßwiderstand trotz erniedrigtem $pCO_2$ abnahm.

HARPER und BELL (1963) versuchten, eine Beziehung zwischen Gehirndurchblutung und dem arteriellen pH aufzustellen. Bei ihren Versuchen ergab sich keine Korrellation zwischen beiden Größen.

Die genannten Autoren verwendeten bei ihren Experimenten meist Methoden, die keine kontinuierliche Messung der einzelnen Parameter erlaubten. So kann z. B. die Gehirndurchblutung sowohl bei der von KETY und SCHMIDT (1945) angegebenen Methode, als auch mit Hilfe radioaktiver Edelgase nicht fortlaufend registriert werden, ebenso geben intermittierende Blutgasanalysen nur ein unvollständiges Bild über die Vorgänge, die sofort nach der Injektion beginnen und nur kurze Zeit dauern.

BETZ, KOZAK und HEREDIA (1966), sowie BETZ und KOZAK (1967) und KOZAK (1968) untersuchten bei Katzen die Wirkung von Hypoxie und Hyperkapnie auf die cerebrale corticale Durchblutung. Dabei ergab sich eine Beziehung zwischen Gehirndurchblutung und extracellulärem, corticalem pH.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob bei primären pH-Änderungen im Blut durch intravenöse Gaben von Säuren und Basen der gleiche Regulationsmechanismus vorliegt, oder ob noch andere Mechanismen der Gefäßweitenregelung bei Säure- und Baseninjektionen diskutiert werden müssen.

## Methoden

### a) Messung der Gehirndurchblutung

Die lokale corticale Gehirndurchblutung wurde mit einem Wärmeleitmesser nach HENSEL (1953/54) gemessen, der für die Applikation auf die Gehirnoberfläche modifiziert worden war (BETZ und SCHMAHL 1966). Der Meßkopf aus Plexiglas hat die Form eines flachen Zylinders (Durchmesser 8 mm) mit einem Stiel an der Oberseite zur Führung der Meß- und Heizleitung. Zwei plangeschliffene Feingoldplättchen (Durchmesser 1 mm, Abstand 2 mm) sind in den Boden des Zylinders wasserdicht eingelassen. Eines von beiden ist auf seiner der Meßfläche abgewendeten Seite mit einer zirkulären Nut versehen, in die eine Heizwicklung aus Konstantandraht (0,03 mm) eingelegt ist. Die zentrale Bohrung in beiden Plättchen nimmt die Lötstelle von drei hintereinandergeschalteten, gegeneinander isolierten Kupfer-Konstantan-Thermoelementen auf. An Heizkörper und Thermoelement gelötete Kupferdrähte werden durch den Meßkopfstiel nach außen geführt. Ein Luftspalt zwischen Meßsystem und Deckel schützt vor äußeren thermischen Einflüssen. Der Stiel des Meßkopfes ist federnd gelagert, um einen möglichst gleichmäßigen Druck auf das Gehirngewebe zu erreichen. Die Federung ist ähnlich den von BETZ und WÜLLENWEBER (1962) entwickelten Typen, der Auflagedruck beträgt 3-5 p/cm$^2$. Zur Eichung wurde das Element auf plane Medien bekannter Wärmeleitzahl aufgesetzt und das von GOLENHOFEN, HENSEL und

HILDEBRANDT (1962) angegebene Verfahren angewandt. Ein Bild des Meßkopfes zeigt Abb. 1.

Die Methode der fortlaufenden Durchblutungsmessung mit Hilfe geheizter Thermoelemente wurde von GIBBS (1933) entwickelt und von HENSEL (1953/54) modifiziert. Von der geheizten Lötstelle des auf die Gewebsoberfläche aufgesetzten Thermoelementes wird der Wärmeabtransport kontinuierlich gemessen. Die Abkühlung der geheizten Lötstelle erfolgt außer durch Konduktion vor allem durch Blutkonvektion. Als Maß des kombinierten konduktiven und konvektiven Wärmetransports verwenden wir die Wärmetransportzahl (cal · $cm^{-1}$ · $sec^{-1}$ · $°C^{-1}$). Die Beziehung zwischen Durchblutung und Wärmetransport ist auf der Hirnoberfläche häufig linear (BETZ, INGVAR und Mitarbeiter 1966). Die Beziehung zwischen Wärmeabtransport, Heizstromstärke ($I^2$) und der Temperaturdifferenz ($\vartheta$) zwischen geheizter und nicht geheizter Lötstelle ist nach GRAYSON (1952) und HENSEL (1953/54):

$$\lambda = \frac{K \cdot J^2}{\vartheta} - a$$

$\lambda$ bedeutet Wärmetransportzahl, sie wird in cal · $sec^{-1}$ · $cm^{-1}$ · $°C^{-1}$ gemessen.

Die Konstante K ist eine für jede Sonde neu festzulegende Größe, und zwar mit Hilfe von Medien bekannter Wärmeleitzahl.

a ist ein Maß des Wärmekurzschlusses zwischen geheizter und nicht geheizter Lötstelle über die Drahtverbindung der Sonde.

$\vartheta$ wird kontinuierlich gemessen.

Die Heizung erfolgt mit Gleichstrom. Die heizbare Lötstelle hatte bei diesen Versuchen gegenüber der ungeheizten eine Übertemperatur von ca. 1 - 2°C. Die Registrierung der Übertemperatur erfolgte kontinuierlich mit einem Photozellkompensationsschreiber ("Fluvograph", Hersteller: Firma Hartmann und Braun, Frankfurt/Main) (s. Abb. 2)

Da die Änderungen der Wärmetransportzahlen kein absolutes Maß für die corticale Durchblutung darstellen, wurde in einigen Versuchen die Gehirndurchblutung zusätzlich mit der $Kr^{85}$-Clearance-Methode gemessen. Diese Messung kann nur diskontinuierlich vorgenommen werden. Sie ergibt Mittelwerte der lokalen Durchblutung in ml Blut/g Gewebe · min über eine Meßzeit von mindestens 10 Minuten. Bei kombinierter Anwendung beider Methoden war eine absolute Messung schneller lokaler Gehirndurchblutungsänderungen möglich.

In einer Modifikation der von INGVAR und LASSEN (1962) beschriebenen Methodik wurde eine kleine Menge des in 0,9 % NaCl-Lösung gelösten $Krypton^{85}$ schnell in eine A. Carotis injiziert. Ein GEIGER-MÜLLER-Rohr registrierte den Anstieg und den Abtransport der Radioaktivität auf der Gehirnoberfläche. Da der Detektor des Rohres (Typ 20th century Electronics) nur eine geringe Empfindlichkeit für $\gamma$ -Strahlung besitzt, und da außerdem die Strahlung des Isotops zu 96 % aus $\beta$ -Emission besteht, konnte die $\gamma$ -Strahlung vernachlässigt werden. Die

spezifische Aktivität betrug 1,0 Curie/13,6 ml Gas bei 760 mm Hg. In 100 ml steriler NaCl-Lösung wurden 0,25 Curie aufgelöst und pro Injektion ca. 0,1 -0,2 ml verwendet. Ein Ratemeter integrierte die Impulse mit einer Zeitkonstanten von 1 sec; ein Zählwerk registrierte die gesamte Impulszahl über die Meßzeit bis zur Erreichung der Hintergrundaktivität.

Die notwendige Durchblutungskonstanz während der Meßzeit konnte mit Hilfe des Wärmeleitmessers überwacht werden. Dabei zeigte sich, daß über längere Zeit kleinere Schwankungen unvermeidbar sind, die jedoch die Messung nicht wesentlich beeinträchtigen. Die Löslichkeit des Gases im Gewebe ist von dessen physiko-chemischen Eigenschaften abhängig und variiert von Tier zu Tier nicht wesentlich. Als mittlerer Verteilungsquotient zwischen Gewebe und Blut wurde ein Wert von 0,95 ml/g (INGVAR und LASSEN 1962) verwendet, unberücksichtigt blieben dabei spontane Änderungen des Hämatokrits.

Aus dem Quotienten von initialer Ausschlaghöhe (H) und der Gesamtaktivität während der 15-minütigen Meßzeit kann die Durchblutung in ml/g · min errechnet werden. (Weitere Einzelheiten siehe INGVAR und LASSEN 1962, BETZ und Mitarbeiter 1966, ZIERLER 1965).

Beispiele für die Eichung der Wärmetransportzahlen in absoluten Werten zeigt Abb. 3.

b) Messung des corticalen pH

Das extracelluläre, corticale pH wurde mit einer Einstab-Glaselektrode (Hersteller: Firma Ingold, Frankfurt/Main, Typ 4o3-3o-M8) fortlaufend gemessen. Die Messung erfolgte auf einem ca. 15 $mm^2$ großen Areal des cerebralen Cortex. Die Glasmembran an der Unterseite der Elektrode ist leicht konkav gestaltet, so daß auftretende pH-Schwankungen in einem mit Liquor gefüllten, kapillären Spalt zwischen Gewebsoberfläche und Elektrode gemessen werden. Da die Änderungen der Wasserstoffionen-Konzentration auf der Pia erfaßt werden, kann man nicht zwischen extracellulärem, intracorticalem pH und dem extracellulären pH der Piagefäße unterscheiden. Es wurde sorgfältig darauf geachtet, daß beim Aufsetzen der Elektrode keine Deformierung des Gehirns auftrat und daß sie auf kein größeres Gefäß gebracht wurde. Die Eichung der Meßkette erfolgte mit Pufferlösungen von bekanntem pH kurz vor und direkt nach den Messungen. Bei geringfügigen Steilheitsänderungen, die zeitweilig auftragen, wurden die Mittelwerte beider Eichkurven zur Auswertung benutzt.

Zur zeitweiligen Messung des arteriellen pH wurde entweder eine Durchflußelektrode (Hersteller: Firma Ingold, Frankfurt/Main) benutzt, die über zwei Polyäthylenkatheter in die A-fermoralis eingebunden wurde, oder eine Mikro-Glaselektrode (Hersteller: Firma Eschweiler, Kiel).

c) Messung des corticalen $P_{CO_2}$

Der lokale $P_{CO_2}$ auf der Gehirnoberfläche wurde fortlaufend mit einer "spaltlosen", teflonbespannten pH-Elektrode gemessen. Dieser Elektrodentyp wurde zuerst von STOW und RANDALL (1954) entwickelt, später aber noch mehrmals verbessert. Die flache Glasmembran der Elektrode ist zur besseren Stabilisierung mit einem Perlonnetz überzogen. Sie war thermostatisiert, und ihre Einstellgeschwindigkeit betrug 25-60 sec je nach Qualität der Teflonbespannung.
Die zur Eichung verwendeten Gase wurden vorher im Gasanalyseapparat nach SCHOLANDER (1947) analysiert. (Genaue Beschreibung siehe ARNDT und Mitarbeiter 1966).

d) Messung des endexspiratorischen $CO_2$-Gehaltes

Als ungefährer Maßstab für den arteriellen $P_{CO_2}$ wurde die endexspiratorische $CO_2$-Konzentration mit einem Ultrarotabsorptionsschreiber (URAS, Hersteller: Firma Hartmann und Braun Frankfurt/Main) bestimmt.
Durch eine Trachealkanüle wurde ein dünner Polyäthylenschlauch weit in einen Bronchus vorgeschoben und fortlaufend Luft angesaugt, deren $CO_2$-Konzentration registriert wurde. Die Spitzen der bei jeder Exspiration erreichten $CO_2$-Gehalte galten dabei als endexspiratorischer $CO_2$-Gehalt. Es handelte sich dabei um relative

Messungen. Zwar änderten sich arterieller $P_{CO_2}$ und endexspiratorischer $CO_2$-Gehalt stets in der gleichen Richtung, doch die Größe des Gradienten zwischen beiden Parametern konnte nicht sicher abgeschätzt werden.

e) Messung des arteriellen Blutdruckes

Der arterielle Blutdruck wurde in der Aorta thoracica fortlaufend gemessen. Ein dünner PVC-Katheter wurde in die A. femoralis eingeführt und die Blutdruckschwankungen mittels eines Statham-Elementes (Hersteller: Statham, Inc., Puerto-Rico) auf ein Elektromanometer übertragen.

Für die Errechnung des relativen Gefäßwiderstandes wurden die geringen Änderungen des Jugularvenendruckes vernachlässigt.

## Operationstechnik und Versuchsanordnung

Als Versuchstiere dienten insgesamt 40 Katzen, die vorher mit 25 mg/kg Pentobarbital-Na (Nembutal, Hersteller: Firma Abbott GmbH., Frankfurt/Main) intraperitoneal narkotisiert worden waren. Durch diese Dosierung wurde eine Narkosetiefe erreicht, die beim Menschen etwa dem Stadium III entspricht (mittelweite Pupillen, erloschene Konjunktival-, Corneal- und Lidreflexe, erhaltene Lichtreflexe).

Zur intravenösen Gabe von Substanzen während des Versuchs wurde ein PVC-Katheter etwa 10 cm tief in eine Beinvene eingeführt, fixiert und mit einer Knopfkanüle verschlossen. Zur Messung des arteriellen Blutdrucks wurde dann ein Katheter durch die A. femoralis in die Aorta vorgeschoben und fixiert. Bei sorgfältiger Operation konnten Blutverluste vermieden werden. Die anschließend durchgeführte Tracheotomie mit Intubation ermöglichte künstliche Ventilation mit einer Starling-Pumpe.

Ein kleiner Schlauch wurde in einen Bronchus vorgeschoben und fixiert; er diente der kontinuierlichen Bestimmung des endexspiratorischen $CO_2$-Gehalts. Für die Clearance-Messungen mit $Kr^{85}$ wurde die A. lingualis freipräpariert und ein mit Vetren (Hersteller: Firma Promonta,Hamburg) gefüllter Katheter bis zur Abgangsstelle von der A. carotis eingeführt.

Das Tier wurde nun für die weitere Präparation am Schädel in einen Stereotaktor nach BAUMGARTEN (1960) eingespannt.

Nach Freilegung der Schädeldecke entfernte man den Knochen beiderseits des Sinus sagittalis, die Dura wurde incidiert und eine etwa 6 $cm^2$ große Fläche des cerebralen Cortex in der Region des Gyrus suprasylvicus und des Gyrus marginalis freigelegt. Diese Flächen wurden sorgfältig mit Mylarfolie (Hersteller: Firma Du Pont, Genf) abgedeckt, die nur die Aufsatzstellen der Elektroden freiließ. Die Elektroden, die zum Teil federnd gelagert oder mit einem Gegengewicht versehen waren, wurden mit Hilfe von Mikromanipulatoren auf etwa symmetrisch gelegene Punkte des Cortex aufgesetzt. Der Wärmeleitmesser wurde ebenfalls auf geeignete Gefäßbereiche gebracht und mit Zellstoffringen thermisch isoliert.

Ein 6-fach-Schreiber mit einer Schreibbreite von 25 cm (Hersteller: Rikadenki, Tokio) konnte alle gemessenen Größen fortlaufend registrieren. Die Papiertransportgeschwindigkeit betrug meist 2o mm/min, konnte aber variiert werden.

Nach Beendigung der Operation und nach jeder Injektion wurden für etwa 1o min spontane Registrierungen vorgenommen, um möglichst vor den Versuchen einen steady-state zu erlangen.

Einen Überblick über die gesamte Versuchsanordnung gibt Abb. 4.

Ein schematisches Diagramm des Katzengehirnes mit den Aufsatzstellen einzelner Elektroden zeigt Abb. 5.

## Versuchsergebnisse

### a) Alkalose des Blutes durch Bikarbonat-Injektion

Die akuten Änderungen der gemessenen Größen bei intravenöser Gabe von $NaHCO_3$ lassen sich anhand der Originalregistrierung in Abb. 6 demonstrieren: Sofort nach Injektionsbeginn steigt die corticale Gehirndurchblutung an, ebenso der $P_{CO_2}$ auf der Cortexoberfläche. Das extracelluläre corticale pH fällt um etwa 0,05 pH-Einheiten, während der arterielle Blutdruck annähernd konstant bleibt. Der endexspiratorische $CO_2$-Gehalt ist für kurze Zeit erhöht. Nach etwa 8 Minuten sind bis auf den noch erhöhten $P_{CO_2}$ alle Meßgrößen auf den Ausgangswert zurückgekehrt.

Aus Abb. 7 wird deutlich, daß das arterielle pH gleich nach der Injektion stark ansteigt und bei Versuchsende noch immer deutlich erhöht ist. Der corticale Gefäßwiderstand, der im Reaktionsverlauf abgenommen hatte, hat jedoch den Ausgangswert wieder erreicht. Bei diesen Meßgrößen kann er nur als relative Größe angegeben werden; er leitet sich her aus dem Quotienten von Druckänderung und Durchblutungsänderung (gemessen als $\triangle \lambda$).
Die Werte wurden prozentual vom Ausgangswert (= 100 %) errechnet:

$$\triangle W = \left[ \frac{100 + \triangle P\ \%}{100 + \triangle \lambda\ \%} - 1 \right] \cdot 100\ \%$$

Die Mittelwertkurve mit den Standardabweichungen aus 35 Versuchen zeigt Abb. 8. Die Standardabweichungen wurden nach der Formel

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}}$$

errechnet.

Dabei bedeutet x die Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert, n die Anzahl der Messungen.

Die Kurve zeigt, wie in den Originalregistrierungen schon deutlich wurde, folgende Charakteristika :

Injektion von Natrium-Bikarbonat erzeugt eine starke Alkalose des arteriellen Blutes. Trotz dieser Reaktion steigt die Gehirndurchblutung an, verbunden mit einem Abfall des corticalen pH. Der corticale $P_{CO_2}$ sowie der endexspiratorische $CO_2$-Gehalt steigen ebenfalls an, während der arterielle Blutdruck nur unwesentlich erhöht ist. Nach etwa 12 Minuten haben alle Größen, mit Ausnahme des corticalen $P_{CO_2}$ und des arteriellen pH, ihren Ausgangswert wieder erreicht. Am Verlauf der Kurve wird deutlich, daß eine recht gute Korrelation zwischen dem relativen corticalen Gefäßwiderstand und dem corticalen pH besteht.

Tabelle 9 zeigt, daß die Bikarbonat-Konzentration auf dem Cortex bei Reaktionsbeginn abfällt, im weiteren Verlauf jedoch leicht erhöht ist. Sie wurde mit Hilfe der HENDERSON-HASSELBALCH'schen Gleichung errechnet, wobei ein Wert von 6,13 für die erste Dissoziationskonstante der Kohlensäure verwendet wurde (MITCHELL 1965). Als Wert für den $CO_2$-Löslichkeitskoeffizienten wurden 0,0312 mMol/Liter · mm Hg bei 38°C angenommen (MITCHELL u. Mitarbeiter 1965).

Die Formel sah dann folgendermaßen aus:

$$pH = 6.13 + \log \frac{HCO_3'^-}{a\ P_{CO_2}}$$

Abb. 9 zeigt prozentual die Anstiege und Abfälle der gemessenen Größen während der Versuche, wobei die Gesamtzahl = 100 % gesetzt wurde. Die Mehrheit der jeweiligen Reaktionsabläufe wird durch die dunklen Säulen repräsentiert. Auch aus dieser Aufstellung wird deutlich, daß eine Korrelation zwischen dem corticalen Gefäßwiderstand und dem corticalen pH besteht.
Die Einzelergebnisse von 35 $NaHCO_3$-Injektionen sind in den Tabellen1 - 7 zusammengefaßt.

b) Azidose des Blutes durch HCl-Injektion

Ein Beispiel für die akuten Änderungen der gemessenen Größen bei intravenöser Gabe von 0,1 n HCl gibt die Originalregistrierung in Abb. 1o. Sie zeigt, daß die Reaktionsabläufe sich nur geringfügig von denen bei arterieller Alkalose unterscheiden: Die corticale Durchblutung steigt gleich nach Injektionsbeginn an, während das corticale pH zur selben Zeit abfällt. Der corticale $P_{CO_2}$ und der endexspiratorische $CO_2$-Gehalt sind ebenfalls angestiegen, während der arterielle Blutdruck annähernd konstant bleibt. Der relative Gefäßwiderstand nimmt vorübergehend ab. Im weiteren Reaktionsverlauf kommt es zu einer

Erhöhung des corticalen pH über den Ausgangswert hinaus, verbunden mit einer Erhöhung des relativen Gefäßwiderstandes.

Dieser Verlauf kann durch die Mittelwertkurve (Abb. 11) noch mehr verdeutlicht werden:

Die corticale Gehirndurchblutung steigt sofort nach Injektionsbeginn an, geht dann zurück auf den Ausgangswert und ist im weiteren Verlauf erniedrigt. Das corticale pH verhält sich gerade gegensätzlich: Dem initialen Abfall folgt später ein Anstieg über den Ausgangswert hinaus.

Der corticale $P_{CO_2}$ und der endexspiratorische $CO_2$-Gehalt steigen zunächst an, erreichen aber bald wieder den Ausgangswert und sind am Versuchsende leicht erniedrigt.

Das arterielle pH ist zu Beginn der Reaktion stark erniedrigt und bleibt auch während des weiteren Verlaufs unter dem Ausgangswert. Der arterielle Blutdruck schwankt nur unwesentlich um die Ausgangslage.

Aus Tabelle 25 geht hervor, daß die corticale Bikarbonatkonzentration zunächst abnimmt, im weiteren Verlauf jedoch erhöht ist. Die prozentualen Anstiege und Abfälle der gemessenen Größen sind in Abb. 15 zusammengefaßt. Die Gesamtzahl der Versuche wurde gleich 100 % gesetzt; die Mehrheit der jeweiligen Reaktionen wird durch die dunklen Säulen dargestellt.

Die Einzelergebnisse von 40 HCl-Injektionen sind in den Tabellen 10 - 24 zusammengestellt.

## Diskussion der Ergebnisse

Die Inhalation von $CO_2$ verursacht eine starke Erweiterung der Gehirngefäße, die Verminderung des $CO_2$-Drucks im Gehirn dagegen eine Verminderung der Gehirndurchblutung, verbunden mit einer Erhöhung des Gehirngefäßwiderstandes.

Untersuchungen von LASSEN (1959) und HARPER und BELL (1963) ergaben, daß bei gleichbleibendem arteriellen $CO_2$-Druck eine Veränderung der Wasserstoffionenkonzentration im Inneren der Blutgefäße des Gehirns zu keiner Veränderung der Gehirndurchblutung führt. Diese Versuche waren bei künstlich beatmeten Tieren durchgeführt worden, so daß die Atmungsregulation durch das Atemzentrum nicht wirksam werden konnte. In den von mir durchgeführten Untersuchungen blieb die Atemregulation jedoch intakt. Es zeigte sich beim spontan atmenden Tier, daß die besten Korrelationen zwischen lokalem corticalem Gefäßwiderstand und der lokalen extracellulären Wasserstoffionenkonzentration bestanden. Aus Experimenten von ROY und SHERRINGTON (1890) und späteren Untersuchungen, z. B. von INGVAR und RISBERG (1967), ging hervor, daß die Gewebsacidose für die Vasodilatation im Gehirn verantwortlich ist. Bei diesen Untersuchungen wurde die Veränderung der Aktivität der Gehirnzellen als Ursache für die Gefäßweitenänderungen angesehen und vor allem das im Stoffwechsel entstehende $CO_2$ für die Gefäßreaktionen verantwortlich gemacht. Bei Untersuchungen über die Wirkung des Sauerstoffmangels (BETZ und HEUSER 1967,

LASSEN 1968) zeigte sich jedoch, daß auch der $CO_2$-Druck nicht in allen Fällen mit der Weitenänderung im Gehirn korrelierte, daß sich aber auch hier deutliche Beziehungen zwischen extracellulärem corticalen pH und dem corticalen Gefäßwiderstand fanden. Es ergibt sich die Frage, ob die Änderung der extracellulären $H^+$-Konzentration der entscheidende Mechanismus für die Einstellung der Gehirngefäßweite ist. Bei Untersuchungen der Wirkung von Pharmaka fanden BETZ und HEUSER (1967), daß bei Injektion von Papaverin bei Verminderung des Gefäßwiderstandes eine Erhöhung des extracellulären pH stattfand. Von PICKERODT (unveröffentlicht) wurde gesehen, daß unter schwerster Hyperventilation ebenfalls die Beziehung zwischen extracellulärer corticaler Wasserstoffionenkonzentration und der Einstellung des Gehirngefäßwiderstandes gestört war. Damit ist klar, daß es prinzipiell auch noch andere Mechanismen gibt, welche den Gehirngefäßwiderstand steuern. Diese Reaktionen sind pathophysiologisch bedeutsam.
Die in den Ergebnissen dieser Arbeit dargestellten Beziehungen sind solche, die im Rahmen physiologischer Regulationen vorkommen und hierbei Bedeutung haben. Die Versuche ergeben noch keinen Aufschluß darüber, ob die Wasserstoffionen selbst an der glatten Gefäßmuskulatur angreifen, oder ob noch ein anderer, bisher nicht bekannter Mechanismus zwischengeschaltet ist.
Die gegenläufige Änderungen der Wasserstoffionen-Konzentration im Blut und Gehirngewebe, bzw im Extracellulärraum des Gehirns sind schon mehrfach beobachtet worden;

sie lassen sich durch verschiedene Diffusionsgeschwindigkeiten von $CO_2$, Wasserstoffionen und Bicarbonat durch die Blut-Hirnschranke erklären (LEUSEN 1954, DE BERSAQUES 1955, TSCHIRGI und TAYLOR 1958, ROBIN u. a. 1958, LAMBERTSEN u. a. 1961, MERWARTH und SIEKER 1961, VON VARENBERG 1963, WYKE 1963, RAPOPORT 1964, WINTERS und DELL 1964, MITCHELL und SINGER 1965).

Die genannten Autoren konnten zeigen, daß im Gegensatz zu dem schnell diffundierenden $CO_2$ das Bicarbonat, Wasserstoffionen und das Laktat sehr langsam vom Blut in den Liquor diffundieren. Daß es nach Injektion von Natriumbicarbonat zu einer Verminderung der Wasserstoffionenkonzentration im Extracellulärraum des Gehirns kommt, obwohl im Blut eine Alkalose besteht, liegt daran, daß $CO_2$ nach Injektion von Bicarbonat sehr schnell in das Gewebe diffundiert und dort eine Acidose verursacht. Die starke Base hingegen kann nicht in den Extracellulärraum hineindiffundieren, verursacht aber eine Alkalose im Blut. Verbunden mit dieser Reaktion ist ein Abfall des Gefäßwiderstandes auf dem Cortex. Der Mechanismus der Wirkung von starken Säuren kann folgendermaßen erklärt werden: Salzsäure als eine starke Säure treibt $CO_2$ aus dem Blut. Dieses freigesetzte $CO_2$ diffundiert schnell in das Gehirngewebe und verursacht dort eine Acidose, die den initialen Abfall des corticalen pH erklärt. Zusätzlich zu dieser Reaktion kommt es durch den erhöhten $CO_2$-Druck am Atemzentrum und durch das erniedrigte pH an den peripheren Chemorezeptoren zu einer erhöhten Ventilation und da-

mit zu einer erhöhten Ausscheidung von $CO_2$ über die Lungen. Dabei wird der hohe $CO_2$-Partialdruck in Blut und Gewebe gesenkt, und zwar unter den ursprünglichen Wert. Um einen hierdurch bedingten Anstieg des pH im Gehirn zu verhindern, müßte ein Transport von Wasserstoffionen aus dem Blut in das Gehirngewebe in ähnlicher Geschwindigkeit erfolgen wie das Abrauchen des $CO_2$.

Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, daß der Transport von Wasserstoffionen nicht so schnell erfolgt und daß eine Drift des corticalen pH in alkalische Richtung in einer großen Zahl von Fällen beobachtet werden kann. Diese Reaktion geht mit einer Erhöhung des corticalen Gefäßwiderstandes einher.

Es kann trotz der durch diese Untersuchungen nicht vollständig erklärten Beziehungen zwischen Wasserstoffionenkonzentration und Gehirngefäßwiderstand gesagt werden, daß bei metabolischen Acidosen und Alkalosen das corticale pH eine wichtige Position innerhalb der Mechanismen einnimmt, die die Weite der Gehirngefäße regeln. Unter pathologischen Kreislaufbedingungen, sowie auch bei der Wirkung von gefäßaktiven Substanzen spielen aber noch andere Faktoren, wie z. B. der extravasale Flüssigkeitsgehalt oder die Wirkung andersartiger Ionen auf die glatte Gefäßmuskulatur eine wesentliche Rolle.

Zusammenfassung
==========

In der vorliegenden Arbeit wurden an 35 bzw. 40 Katzen in Narkose (25 mg/kg Pentobarbital-Na) die cerebrale corticale Gehirndurchblutung, das corticale pH, der corticale $P_{CO_2}$, das arterielle pH, der arterielle Blutdruck und der endexspiratorische $CO_2$-Gehalt fortlaufend registriert. Die Änderungen der gemessenen Größen bei metabolischer Alkalose durch intravenöse Gabe von $NaHCO_3$ und bei metabolischer Azidose durch intravenöse Gabe von HCl wurden über 12 Minuten beobachtet. Es stellte sich heraus, daß eine Beziehung zwischen dem extracellulären corticalen pH und dem corticalen Gefäßwiderstand besteht, während bei den anderen Meßgrößen eine ähnliche Korrelation nicht nachzuweisen war. Die Bedeutung der Befunde wird diskutiert, aber auch auf andere Regulationsmöglichkeiten hingewiesen.

Bei akuten Änderungen im Säure-Basen-Haushalt des Gehirns muß dem corticalen extracellulären pH eine entscheidende Stellung für die Regulation der corticalen Gehirndurchblutung zugeordnet werden.

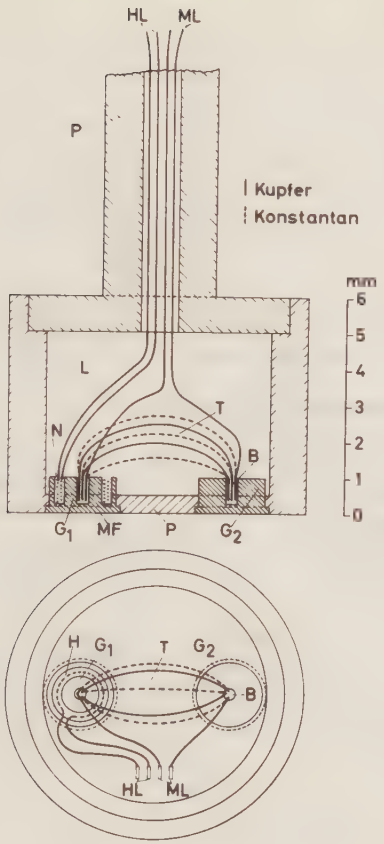


Abb. 1

Wärmeleitmesser zur lokalen Durchblutungsregistrierung auf der Gehirnoberfläche. Schnitt durch das Meßelement und Aufsicht auf die Innenseite.

| | | | |
|---|---|---|---|
| P | Plexiglaskörper | MF | Meßfläche |
| $G_1$ | geheizte Goldplatte | $G_2$ | geheizte Vergleichsplatte |
| H | Heizwicklung | T | Thermostatterie |
| HL | Heizstromzuleitung | ML | Meßleitung |
| B | Bohrung f. d. Thermoelement | N | Nut f. d. Heizwicklung |
| L | Luftspalt | | |

(nach BETZ, E., Habil-Schrift 1964)

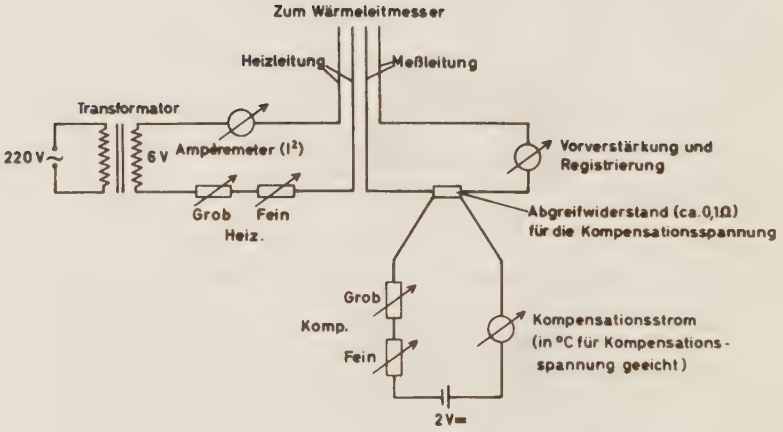


Abb. 2

Prinzipschaltbild zur Wärmeleitmessung

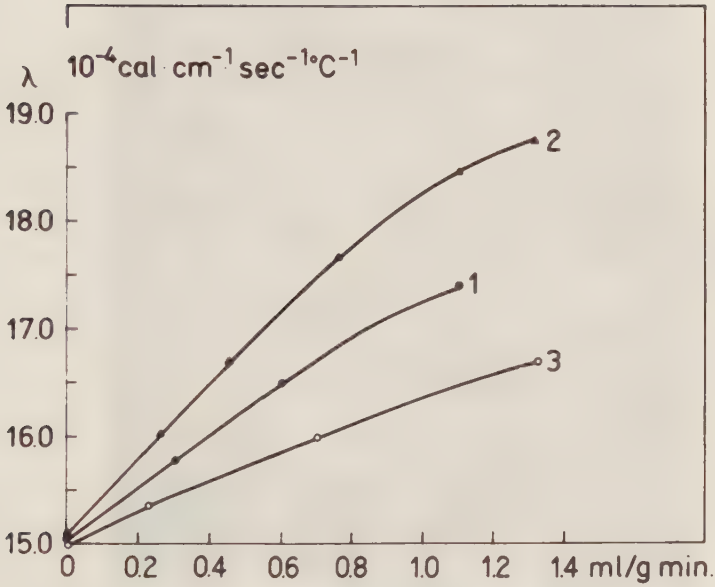


Abb. 3

Beziehung zwischen $Kr^{85}$-Clearance und Wärmetransport bei 3 Katzen in Pentobarbital-Anaesthesie.

Kurve Nr. 1 gehört zu Abb. 6
Kurve Nr. 3 gehört zu Abb. 10

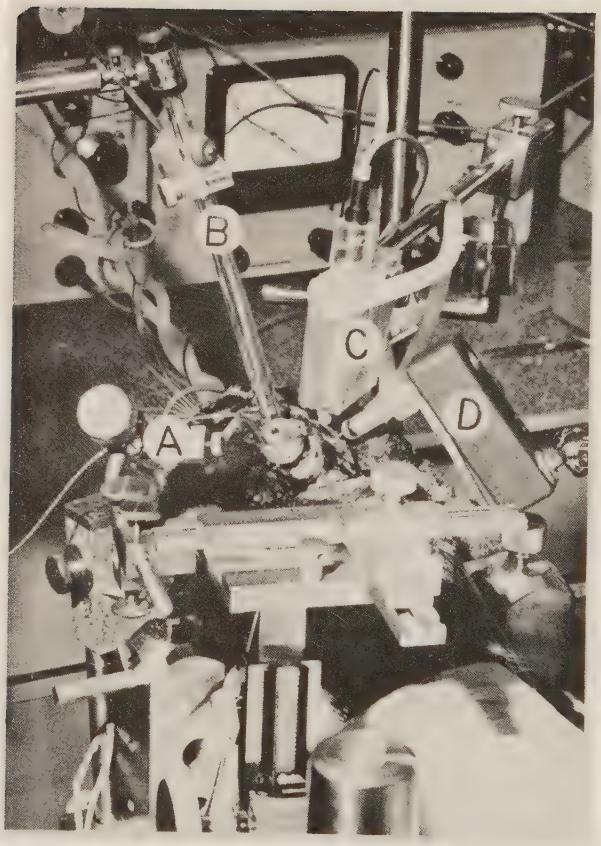


Abb. 4

Versuchsanordnung

A: Wärmeleitmesser zur Registrierung der lokalen Gehirndurchblutung auf dem cerebralen Cortex.

B: Einstab-Glaselektrode zur Messung des lokalen, extracellulären pH.

C: Teflonbespannte, "spaltlose" pH-Elektrode zur Messung des lokalen $P_{CO_2}$ auf der Cortexoberfläche.

D: Mehrdraht-Platin-Elektrode zur fortlaufenden Messung des $P_{O_2}$ auf der Cortexoberfläche.

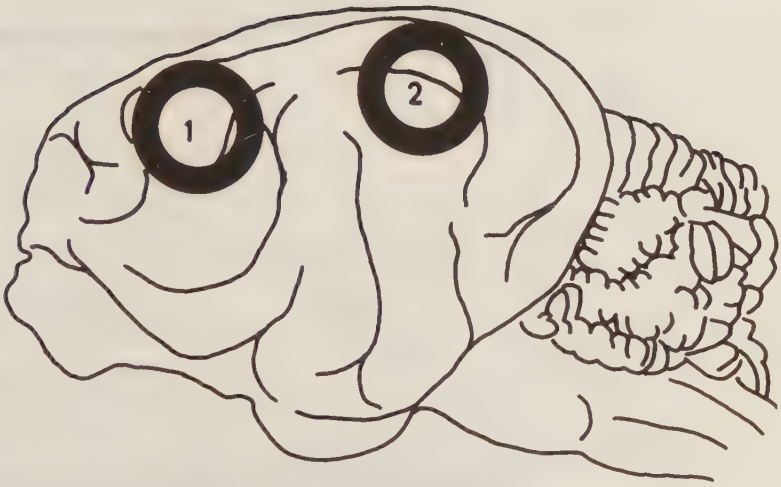


Abb. 5

Schematisches Diagramm des Katzengehirnes mit den Aufsatzstellen einzelner Elektroden.
Nr. 1: Lage im Bereich des Gyrus suprasylvicus anterior
Nr. 2: Lage im Bereich des Gyrus suprasylvicus medialis

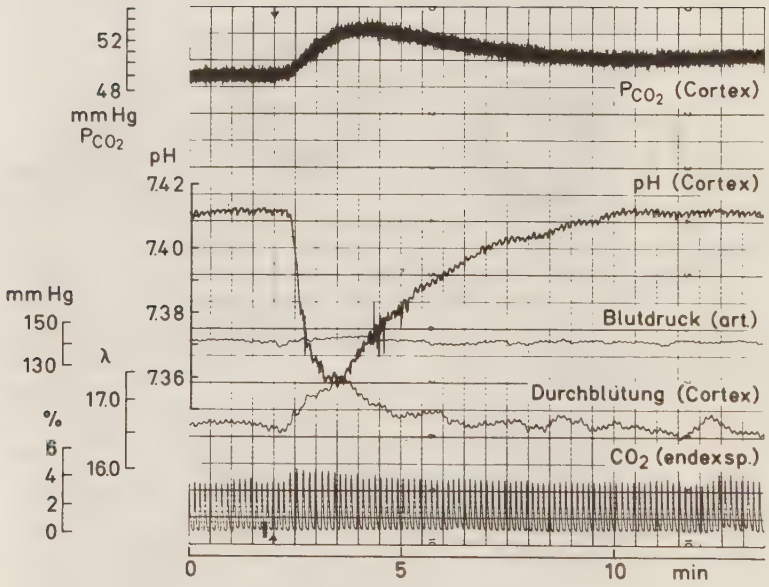


Abb. 6

Effekt von intravenöser Gabe von 35 mg/kg $NaHCO_3$ auf die corticale Gehirndurchblutung, corticales pH, corticalen $P_{CO_2}$, endexspiratorischen $CO_2$-Gehalt und arteriellen Blutdruck.

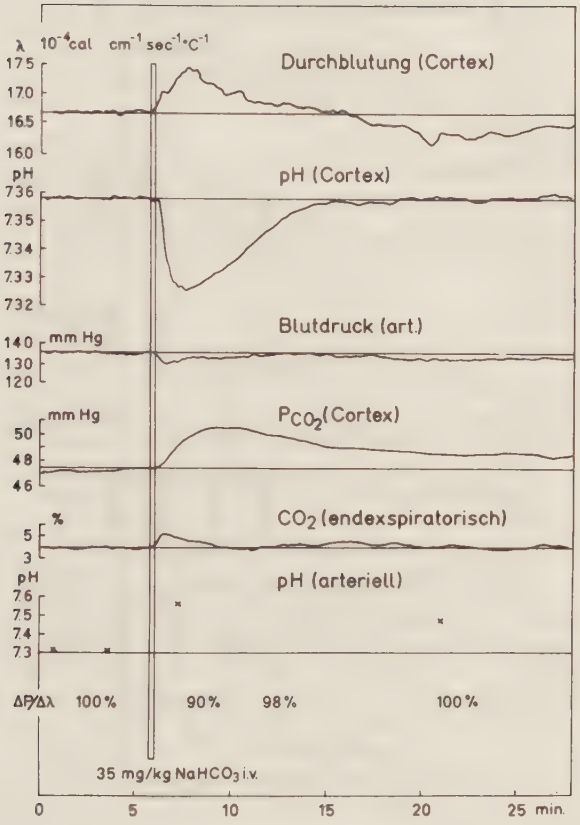


Abb. 7

Effekt einer Injektion von 35 mg/kg $NaHCO_3$ i.V. bei Messung der corticalen Gehirndurchblutung, des corticalen pH, des corticalen $P_{CO_2}$, des endexspiratorischen $CO_2$-Gehaltes, des arteriellen pH, des arteriellen Blutdrucks und des relativen corticalen Gefäßwiderstandes.

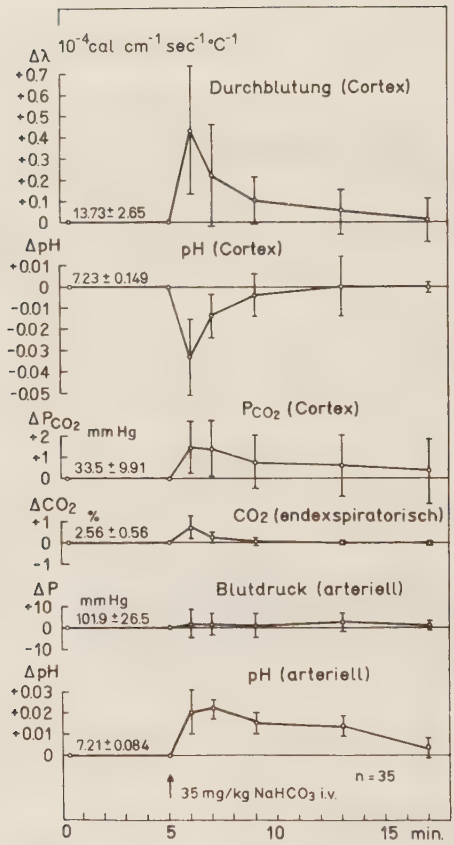


Abb. 8

Mittelwertkurven mit Standardabweichungen von 35 Versuchen nach i.V. Gabe von $NaHCO_3$.

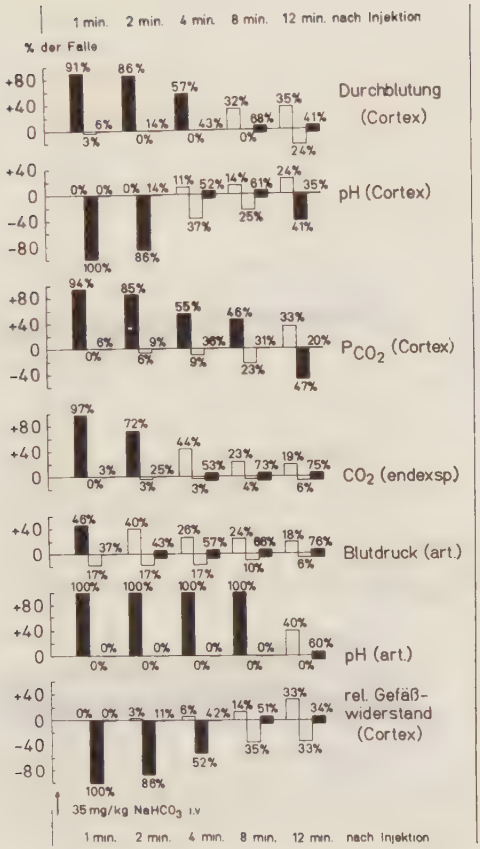


Abb. 9

Reaktionen von 35 Katzen auf Injektion von 35 mg/kg $NaHCO_3$. Die Ordinatenwerte geben prozentuale Meßwerte an. Die Zahlenwerte stehen in % der Gesamtwerte über den einzelnen Säulen. Die dunklen Säulen repräsentieren diejenige Reaktionsweise, welche mit der größten Häufigkeit auftrat.

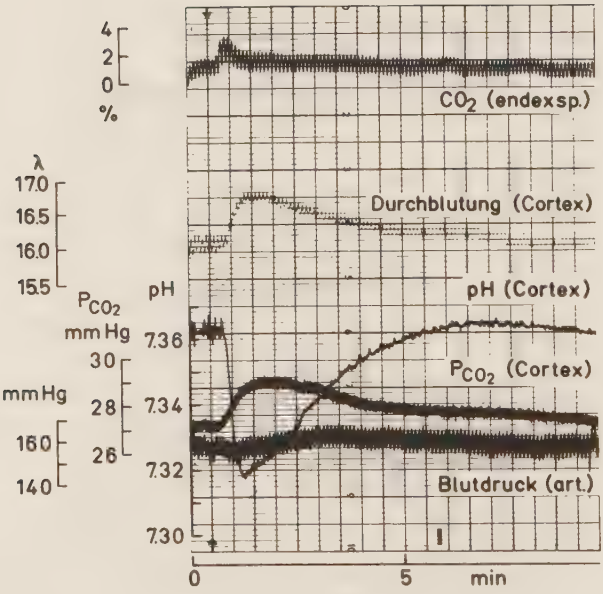


Abb. 10

Effekt von intravenöser Gabe von 1/3 n HCl auf corticale Gehirndurchblutung, corticales pH, corticalen $P_{CO_2}$, endexspiratorischen $CO_2$-Gehalt und arteriellen Blutdruck.

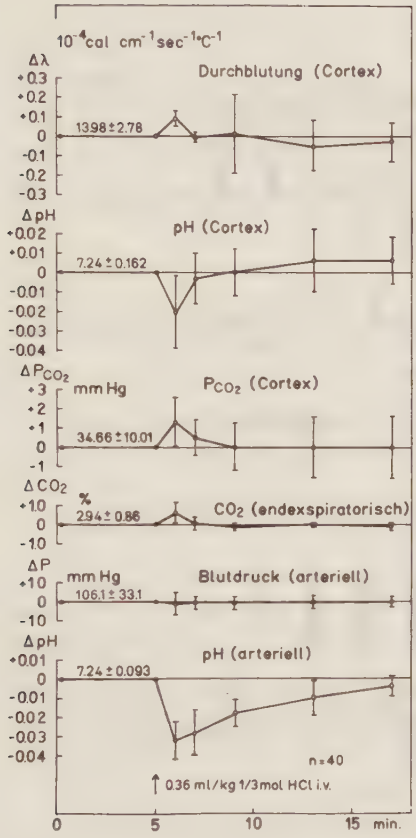


Abb. 11

Mittelwertkurven mit Standardabweichungen von 40 Versuchen bei intravenöser Gabe von 1/3 n HCl.

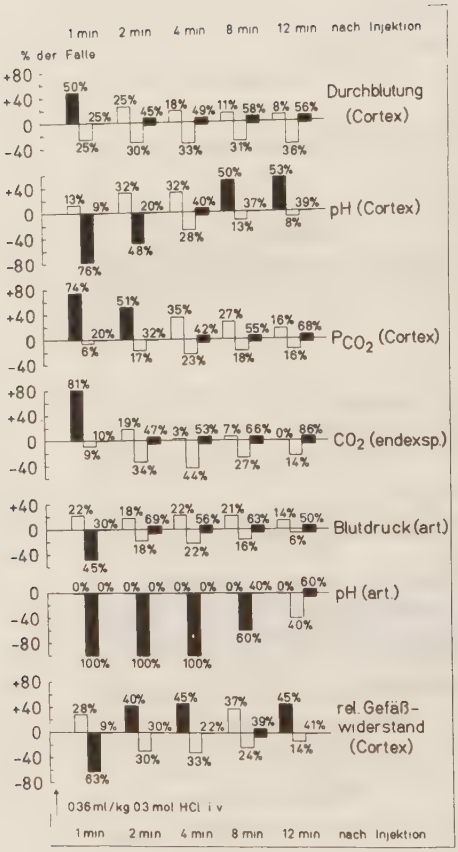


Abb. 12

Reaktionen von 40 Katzen auf Injektion von 1/3 n HCl. Die Ordinatenwerte geben prozentuale Meßwerte an. Die Zahlenwerte stehen in % der Gesamtwerte über den einzelnen Säulen. Die dunklen Säulen repräsentieren diejenige Reaktionsweise, welche mit der größten Häufigkeit auftrat.

## Legenden zu den Tabellen I - XXV

### Tabellen I - VIII:

Einzelergebnisse der Veränderungen der gemessenen und errechneten Größen nach $NaHCO_3$-Injektionen bei 35 Katzen in Pentobarbital-Anaesthesie (25 mg/kg).

### Tabelle IX:

Mittelwerte und Standardabweichungen der Einzelergebnisse von 35 Versuchen bei intravenöser Gabe von $NaHCO_3$ (100 mg/kg).

### Tabellen X - XXIV:

Einzelergebnisse der Veränderungen der gemessenen und errechneten Größen nach HCl-Injektionen bei 40 Katzen in Pentobarbital-Anaesthesie (25 mg/kg).

### Tabelle XXV:

Mittelwerte und Standardabweichungen der Einzelergebnisse von 40 Versuchen bei intravenöser Gabe von 1/3 n HCl.

| $NaHCO_3$ | | | $\Delta\lambda$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Dosis/ ml | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 2,0 | 12,5 | ± 0 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - |
| 2 | 2,0 | 12,7 | ± 0 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | - |
| 3 | 2,0 | 12,8 | - 0,1 | ± 0 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,05 |
| 4 | 1,0 | 16,0 | + 0,6 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,2 | ± 0 |
| 5 | 1,5 | 19,6 | + 1,0 | + 0,8 | + 0,4 | + 0,4 | - |
| 6 | 1,5 | 19,2 | + 0,8 | + 0,5 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,2 |
| 7 | 1,5 | 19,6 | + 0,8 | + 0,6 | + 0,4 | + 0,3 | + 0,2 |
| 8 | 0,5 | 11,8 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - |
| 9 | 1,0 | 11,9 | + 0,2 | + 0,15 | + 0,1 | ± 0 | - |
| 10 | 1,0 | 11,8 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | - | - |
| 11 | 1,0 | 11,8 | + 0,15 | + 0,1 | + 0,05 | ± 0 | - |
| 12 | 1,5 | 11,8 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,1 | - | - |
| 13 | 1,0 | 11,8 | + 0,15 | + 0,1 | ± 0 | - | - |
| 14 | 1,0 | 12,1 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - 0,2 |
| 15 | 1,0 | 12,5 | + 0,3 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,05 | - 0,1 |
| 16 | 1,5 | 12,3 | + 0,7 | + 1,1 | + 0,2 | ± 0 | - 0,1 |
| 17 | 1,5 | 12,05 | + 0,5 | + 0,35 | + 0,35 | + 0,15 | + 0,1 |
| 18 | 1,0 | 12,05 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,05 | + 0,05 |
| 19 | 1,0 | 12,5 | + 0,3 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 1,0 | 16,3 | + 0,6 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | - |
| 21 | 1,0 | 16,1 | + 0,7 | + 0,3 | ± 0 | - | - |
| 22 | 1,0 | 16,6 | + 0,5 | + 0,1 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 23 | 1,0 | 13,1 | + 0,4 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | - 0,1 |
| 24 | 1,0 | 13,0 | + 0,3 | + 0,1 | ± 0 | + 0,03 | + 0,03 |
| 25 | 1,0 | 12,4 | + 0,4 | + 0,2 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | 1,0 | 12,25 | + 0,4 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 1,0 | 12,25 | + 0,45 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 28 | 1,0 | 13,0 | + 0,35 | ± 0 | + 0 | - | - |
| 29 | 1,0 | 12,2 | + 0,6 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 30 | 1,0 | 12,2 | +0,55 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 31 | 1,0 | 12,65 | + 0,4 | + 0,2 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 1,0 | 12,75 | + 0,3 | + 0,45 | + 0,15 | + 0 | - |
| 33 | 1,0 | 16,3 | + 0,8 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 |
| 34 | 1,0 | 11.8 | + 0,4 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | - |
| 35 | 1,0 | 20,8 | + 1,4 | + 0,5 | + 0,2 | ± 0 | - |

Tab. I

| $NaHCO_3$ | | Δ pH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 7,40 | - 0,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | - |
| 2 | 7,44 | - 0,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | - |
| 3 | 7,48 | -0,02 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 7,48 | - 0,06 | - 0,02 | - 0,01 | ± 0 | + 0,02 |
| 5 | 7,18 | - 0,04 | - 0,01 | - 0,01 | ± 0 | - |
| 6 | 7,05 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 |
| 7 | 7,01 | - 0,03 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,01 | - 0,005 |
| 8 | 6,95 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 9 | 6,94 | - 0,01 | - 0,008 | ± 0 | ± 0 | - |
| 10 | 7,00 | - 0,04 | - 0,02 | - 0,01 | - | - |
| 11 | 7,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 12 | 7,05 | - 0,015 | - 0,012 | + 0,008 | - | - |
| 13 | 7,14 | - 0,01 | - 0,008 | ± 0 | - | - |
| 14 | 7,23 | - 0,04 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,03 | - 0,03 |
| 15 | 7,21 | - 0,10 | - 0,05 | - 0,04 | ± 0 | - 0,01 |
| 16 | 7,22 | - 0,05 | - 0,02 | + 0,005 | + 0,03 | + 0,04 |
| 17 | 7,26 | - 0,035 | - 0,01 | ± 0 | + 0,025 | + 0,03 |
| 18 | 7,26 | - 0,04 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,02 | - 0,02 |
| 19 | 7,34 | - 0,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 7,26 | - 0,015 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 21 | 7,26 | - 0,025 | - 0,005 | - 0,005 | - | - |
| 22 | 7,28 | - 0,01 | - 0.015 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 23 | 7,36 | - 0,035 | - 0,01 | ± 0 | + 0,025 | + 0,03 |
| 24 | 7,35 | - 0,03 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 |
| 25 | 7,19 | - 0,03 | - 0,025 | - 0,02 | - 0,005 | ± 0 |
| 26 | 7,19 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,005 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 7,19 | - 0,03 | - 0,02 | ± 0 | - | - |
| 28 | 7,195 | - 0,035 | - 0,02 | ± 0 | - | - |
| 29 | 7,22 | - 0,05 | - 0,01 | + 0,01 | + 0,03 | - |
| 30 | 7,24 | - 0,06 | - 0,01 | + 0,02 | - | - |
| 31 | 7,34 | - 0,02 | - 0,005 | - 0,005 | - 0,02 | - 0,03 |
| 32 | 7,31 | - 0,02 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 33 | 7,18 | - 0,06 | - 0,02 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 34 | 7,47 | - 0,01 | - 0,005 | ± 0 | ± 0 | - |
| 35 | 7,44 | - 0,03 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |

Tab. II

| $NaHCO_3$ | | $\triangle P_{CO_2}$/Torr | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 22 | + 1,5 | + 1,5 | ± 0 | ± 0 | - |
| 2 | 24 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 3 | 24 | + 0,4 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 18 | + 0,5 | + 0,2 | ± 0 | - 1,0 | - 1,0 |
| 5 | 56 | + 2,0 | + 2,0 | + 2,0 | + 2,0 | - |
| 6 | 50 | + 1,0 | + 2,0 | + 2,0 | + 2,0 | - 1,0 |
| 7 | 49 | + 1,0 | + 2,0 | + 1,0 | + 1,0 | + 1,0 |
| 8 | 44 | + 1,0 | + 1,0 | + 1,0 | + 1,0 | - |
| 9 | 45 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 10 | 46 | ± 0 | - 1,0 | - 1,0 | - | - |
| 11 | 45 | + 1,0 | + 1,0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 12 | 45 | ± 0 | + 1,0 | ± 0 | - | - |
| 13 | 31 | + 1,0 | + 1,0 | + 1,0 | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 28 | + 1,5 | + 1,5 | + 0,8 | - 0,5 | + 0,6 |
| 16 | 27,5 | + 0,5 | + 0,6 | ± 0 | - 0,4 | - 0,4 |
| 17 | 27,5 | + 0,5 | + 0,4 | ± 0 | - 0,1 | - 0,1 |
| 18 | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 30 | + 4,0 | + 2,0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 27 | + 3,0 | + 2,0 | + 2,0 | + 1,0 | - |
| 21 | 29 | + 1,0 | + 2,0 | + 1,0 | - | - |
| 22 | 30 | + 2,0 | - 1,0 | - 2,0 | - 3,0 | - 2,0 |
| 23 | 27,5 | + 0,5 | + 0,4 | ± 0 | - 0,1 | - 0,1 |
| 24 | 50 | + 5,0 | + 5,0 | + 2,0 | + 2,0 | + 2,0 |
| 25 | 24 | + 2,0 | + 3,0 | + 3,0 | + 1,0 | ± 0 |
| 26 | 23 | + 3,0 | + 5,0 | + 4,0 | + 4,0 | + 5,0 |
| 27 | 31 | + 1,0 | + 3,0 | + 3,0 | - | - |
| 28 | 34 | + 1,0 | + 2,0 | + 1,0 | - | - |
| 29 | 35,5 | + 0,5 | + 2,0 | + 1,0 | + 1,0 | - |
| 30 | 38 | + 1,0 | + 2,0 | + 1,0 | - | - |
| 31 | 26 | + 3,0 | + 1,0 | + 1,0 | + 4,0 | + 1,5 |
| 32 | 33 | + 5,0 | ± 0 | - 1,0 | ± 0 | - |
| 33 | 32 | + 2,5 | + 1,5 | ± 0 | ± 0 | + 0,5 |
| 34 | 23,5 | + 1,0 | + 2,0 | + 2,0 | + 2,0 | - |
| 35 | 30 | + 1,0 | + 0,9 | + 0,2 | + 0,1 | - |

Tab. III

| $NaHCO_3$ | $\triangle CO_2$ endexsp. / % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 1,5 | + 0,3 | + 0,5 | + 0,2 | + 0,05 | - |
| 2 | 2,0 | + 0,1 | + 0,3 | + 0,1 | ± 0 | - |
| 3 | 2,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 2,5 | + 0,8 | + 0,4 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 5 | 3,7 | + 1,2 | + 0,3 | ± 0 | ± 0 | - |
| 6 | 2,9 | + 0,9 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 |
| 7 | 2,7 | + 0,7 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 |
| 8 | 2,9 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | + 0 | - |
| 9 | 2,9 | + 0,5 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | - |
| 10 | 2,5 | + 1,0 | + 0,8 | + 0,5 | - | - |
| 11 | 2,4 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | - |
| 12 | 2,5 | + 0,8 | + 0,4 | ± 0 | - | - |
| 13 | 2,5 | + 0,5 | ± 0 | + 0,1 | - | - |
| 14 | 2,9 | + 1,0 | + 0,4 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 15 | 3,2 | + 2,6 | ± 0 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,1 |
| 16 | 3,0 | + 1,0 | + 0,5 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 |
| 17 | 3,0 | + 1,0 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 18 | 2,7 | + 0,8 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 |
| 19 | 2,5 | + 1,3 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 2,0 | + 0,6 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 21 | 2,0 | + 0,8 | + 0,1 | ± 0 | - | - |
| 22 | 1,5 | + 0,5 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,2 | ± 0 |
| 23 | 3,0 | + 1,0 | + 0,5 | + 0,3 | + 0,1 | + 0,1 |
| 24 | 3,0 | + 0,8 | + 0,4 | + 0,2 | + 0,1 | + 0,1 |
| 25 | 2,0 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | 2,0 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 2,7 | + 0,1 | - 0,3 | ± 0 | - | - |
| 28 | 2,2 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 29 | 2,2 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 30 | - | - | - | - | - | - |
| 31 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | 2,9 | + 1,6 | + 0,3 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,1 |
| 34 | 2,0 | + 1,0 | + 0,2 | + 0,2 | ± 0 | - |
| 35 | 4,0 | + 0,7 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - |

. IV

| $NaHCO_3$ | | $\triangle P$ / mm Hg | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg.-Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 110 | - 10 | - 2 | ± 0 | ± 0 | - |
| 2 | 110 | - 10 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 3 | 114 | - 10 | - 2 | + 2 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 140 | + 8 | + 5 | + 5 | + 5 | + 5 |
| 5 | 140 | + 10 | + 5 | ± 0 | ± 0 | - |
| 6 | 155 | + 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 7 | 158 | - 3 | - 3 | - 4 | - 2 | ± 0 |
| 8 | 110 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 9 | 112 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 10 | 105 | + 5 | + 3 | ± 0 | - | - |
| 11 | 110 | ± 0 | - 5 | - 5 | ± 0 | - |
| 12 | 105 | + 8 | + 5 | + 5 | - | - |
| 13 | 110 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 14 | 85 | + 8 | + 5 | - 5 | ± 0 | ± 0 |
| 15 | 70 | - 12 | - 10 | - 6 | + 2 | + 2 |
| 16 | 70 | + 20 | + 20 | + 20 | + 20 | ± 0 |
| 17 | 85 | + 10 | + 10 | + 10 | + 10 | ± 0 |
| 18 | 90 | + 5 | + 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 19 | 110 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 90 | + 10 | + 2 | ± 0 | ± 0 | - |
| 21 | 80 | + 5 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 22 | 78 | + 2 | + 3 | + 4 | ± 0 | ± 0 |
| 23 | 85 | + 10 | + 10 | + 10 | + 10 | ± 0 |
| 24 | 85 | ± 0 | + 3 | ± 0 | + 3 | + 5 |
| 25 | 75 | ± 0 | - 5 | - 5 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | 70 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 70 | + 0 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 28 | 70 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 29 | 70 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 30 | 68 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 31 | 125 | + 5 | ± 0 | ± 0 | - 1 | - 1 |
| 32 | 128 | ± 0 | ± 0 | - 3 | - 3 | - |
| 33 | 110 | + 2 | + 3 | + 3 | + 2 | ± 0 |
| 34 | 135 | - 10 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 35 | 140 | + 1 | + 1 | + 3 | ± 0 | - |

Tab. V

$NaHCO_3$ $\triangle$ $HCO_3^-$ /mMol/l

| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12,78 | - 0,33 | + 0,56 | - 0,01 | - 0,01 | - |
| 2 | 15,29 | - 1,06 | - 0,35 | - 0,01 | - 0,01 | - |
| 3 | 16,76 | - 0,48 | - 0,24 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 12,57 | - 1,31 | - 0,43 | - 0,29 | - 0,70 | - 0,14 |
| 5 | 19,60 | - 1,08 | + 0,24 | + 0,23 | + 0,69 | - |
| 6 | 12,98 | - 0,63 | + 0,11 | + 0,20 | + 0,20 | - 0,56 |
| 7 | 11,6 | - 0,56 | - 0,33 | - 0,3 | - 0,04 | + 0,1 |
| 8 | 9,07 | - 0,005 | + 0,21 | + 0,2 | + 0,2 | - |
| 9 | 9,07 | - 0,11 | - 0,17 | - 0,01 | - 0,01 | - |
| 10 | 10,64 | - 0,94 | - 0,70 | - 0,47 | - | - |
| 11 | 11,41 | - 0,01 | + 0,26 | ± 0 | ± 0 | - |
| 12 | 11,68 | - 0,4 | - 0,07 | + 0,21 | - | - |
| 13 | 9,9 | + 0,08 | + 0,13 | + 0,31 | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 10,50 | - 1,72 | - 0,64 | - 0,65 | - 0,19 | - 0,46 |
| 16 | 10,56 | - 0,99 | - 0,26 | + 0,11 | - 0,42 | + 0,84 |
| 17 | 11,57 | - 0,70 | - 0,1 | ± 0 | + 0,64 | - 0,22 |
| 18 | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 15,18 | + 0,51 | + 0,64 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 |
| 20 | 11,36 | + 0,84 | + 0,85 | + 0,84 | + 0,42 | - |
| 21 | 12,21 | - 0,29 | + 0,61 | + 0,27 | - | - |
| 22 | 13,22 | + 0,56 | - 0,87 | - 0,89 | - 1,33 | - 0,89 |
| 23 | 14,57 | - 0,89 | - 0,10 | - 0,01 | + 0,81 | + 0,97 |
| 24 | 25,89 | + 0,64 | + 0,75 | + 0,41 | + 0,41 | + 0,41 |
| 25 | 8,6 | + 0,09 | + 0,53 | + 0,63 | + 0,25 | - 0,01 |
| 26 | 8,24 | + 0,45 | + 1,34 | + 1,33 | + 1,43 | + 1,79 |
| 27 | 11,10 | - 0,41 | + 0,53 | + 1,08 | - | - |
| 28 | 12,32 | - 0,62 | + 0,14 | + 0,36 | - | - |
| 29 | 13,63 | - 1,31 | + 0,43 | + 0,70 | + 1,37 | - |
| 30 | 15,27 | - 1,62 | + 0,44 | + 1,13 | - | - |
| 31 | 13,16 | + 0,85 | + 0,25 | + 0,33 | + 1,33 | - 0,18 |
| 32 | 15,58 | + 0,55 | ± 0 | - 0,48 | - 0,01 | - |
| 33 | 11,20 | - 0,68 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | + 0,17 |
| 34 | 16,04 | + 0,3 | + 1,17 | + 1,36 | + 1,36 | - |
| 35 | 19,11 | + 0,68 | + 0,57 | + 0,12 | + 0,06 | - |

ab. VI

$NaHCO_3$

$\triangle W$ / %

| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 % | - 9,09 | - 11,64 | ± 0 | ± 0 | - |
| 2 | 100 % | - 9,09 | - 4,35 | ± 0 | ± 0 | - |
| 3 | 100 % | - 0,48 | - 1,75 | - 6,07 | - 7,69 | - 4,00 |
| 4 | 100 % | - 6,97 | - 3,04 | - 0,93 | - 0,93 | + 3,57 |
| 5 | 100 % | - 4,76 | - 5,84 | - 4,76 | - 4,76 | - |
| 6 | 100 % | - 6,61 | - 6,17 | - 3,8 | - 2,56 | - 2,56 |
| 7 | 100 % | - 10,82 | - 8,74 | - 7,17 | - 4,83 | - 2,44 |
| 8 | 100 % | - 50,0 | - 33,33 | ± 0 | ± 0 | - |
| 9 | 100 % | - 40,0 | - 33,33 | - 25,0 | ± 0 | - |
| 10 | 100 % | - 58,1 | - 48,57 | ± 0 | - | - |
| 11 | 100 % | - 42,86 | - 36,36 | - 23,64 | ± 0 | - |
| 12 | 100 % | - 56,95 | - 47,62 | - 30,16 | - | - |
| 13 | 100 % | - 42,86 | - 33,33 | ± 0 | - | - |
| 14 | 100 % | - 21,85 | - 11,76 | - 5,88 | ± 0 | + 66,67 |
| 15 | 100 % | - 37,86 | - 22,86 | - 17,71 | - 2,56 | + 15,71 |
| 16 | 100 % | - 35,71 | - 50,0 | ± 0 | + 28,57 | + 16,67 |
| 17 | 100 % | - 47,06 | - 37,13 | - 37,13 | - 16,18 | - 18,18 |
| 18 | 100 % | - 13,64 | - 13,64 | - 18,18 | - 10,0 | - 10,0 |
| 19 | 100 % | - 25,0 | - 5,26 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 100 % | - 1,47 | - 1,95 | - 2,08 | ± 0 | - |
| 21 | 100 % | - 8,05 | - 6,25 | ± 0 | - | - |
| 22 | 100 % | - 6,76 | + 1,81 | + 3,07 | ± 0 | ± 0 |
| 23 | 100 % | - 11,76 | - 1,38 | + 4,78 | + 11,76 | + 7,14 |
| 24 | 100 % | - 17,65 | - 3,37 | ± 0 | + 1,36 | + 3,66 |
| 25 | 100 % | - 33,33 | - 25,33 | - 12,16 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | 100 % | - 38,1 | - 7,14 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 100 % | - 40,91 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 28 | 100 % | - 20,0 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 29 | 100 % | - 50,0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 30 | 100 % | - 47,83 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 31 | 100 % | - 24,69 | - 16,0 | - 4,55 | - 0,8 | - 0,8 |
| 32 | 100 % | - 20,69 | - 28,13 | - 13,61 | - 2,34 | - |
| 33 | 100 % | - 12,99 | - 3,44 | - 1,47 | + 1,82 | ± 0 |
| 34 | 100 % | - 69,14 | - 50,0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 35 | 100 % | - 12,59 | - 4,48 | - 0,03 | ± 0 | - |

Tab. VII

Tab. VIII

| $NaHCO_3$ | | | $\triangle pH_{art.}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Dosis | Ausg.-Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 0,35 mg/kg | 7.15 | + 0,03 | + 0,03 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,01 |
| 2 | 0,35 mg/kg | 7.16 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,01 | ± 0 |
| 3 | 0,35 mg/kg | 7.17 | + 0,03 | + 0,02 | + 0,01 | - | - |
| 4 | 0,35 mg/kg | 7,15 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,01 | + 0,01 | ± 0 |
| 5 | 0,35 mg/kg | 7.32 | + 0,01 | + 0,02 | + 0,01 | + 0,01 | ± 0 |
| 6 | 0,35 mg/kg | 7.32 | + 0,01 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,01 |
| Mittel-wert | 0,35 mg/kg | 7.21 | + 0,02 | + 0,022 | + 0,015 | + 0,014 | + 0,004 |

| $NaHCO_3$ | Ausgangswert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta\lambda$ [cal·cm$^{-1}$·sec$^{-1}$·°C] | 13,73 (± 2,646) | + 0,43 (± 0,303) | + 0,223 (± 0,241) | + 0,096 (± 0,119) | + 0,053 (± 0,104) | + 0,008 (± 0,102) |
| $\Delta$ pH | 7,233 (± 0,149) | - 0,033 (± 0,019) | - 0,014 (± 0,011) | - 0,004 (± 0,011) | + 0,0002 (± 0,014) | + 0,0003 (± 0,02) |
| $\Delta pCO_2$ [mm Hg] | 33,5 (± 9,91) | + 1,5 (± 1,31) | + 1,4 (± 1,35) | + 0,76 (± 1,25) | + 0,62 (± 1,46) | + 0,32 (± 1,64) |
| $\Delta$ $CO_2$ end-exsp. [%] | 2,56 (± 0,56) | + 0,72 (± 0,53) | + 0,24 (± 0,23) | + 0,08 (± 0,13) | + 0,02 (± 0,07) | + 0,01 (± 0,05) |
| $\Delta$ p arteriell [mm Hg] | 101,9 (± 26,5) | + 1,7 (± 6,8) | + 1,5 (± 5,0) | + 1,0 (± 4,8) | + 1,6 (± 4,6) | + 0,6 (± 1,7) |
| $\Delta$ $HCO_3^-$ [mMol/l] | 13,111 (± 3,599) | - 0,32 (± 0,728) | + 0,167 (± 0,513) | + 0,203 (± 0,528) | + 0,248 (± 0,647) | + 0,174 (± 0,612) |
| $\Delta$ W [%] | | - 26,73 (± 18,88) | - 16,01 (± 16,9) | - 5,9 (± 10,08) | - 0,32 (± 7,18) | + 4,44 (± 17,98) |

Tab. IX

| HCl | | | $\Delta\lambda$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Dosis/ ml | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 1,0 | 19,6 | - 0,4 | - 0,1 | - 0,45 | - 0,5 | - 0,5 |
| 2 | 1,0 | 19,8 | - 0,15 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,2 |
| 3 | 0,5 | 19,6 | - 0,02 | - 0,05 | - 0,1 | - 0,1 | - 0,1 |
| 4 | 0,3 | 18,5 | - 0,1 | - 0,1 | - 0,35 | - 0,4 | - 0,1 |
| 5 | 1,0 | 16,5 | + 0,3 | ± 0 | + 0,1 | - | - |
| 6 | 1,0 | 16,6 | + 0,3 | - 0,2 | ± 0 | - | - |
| 7 | 1,0 | 16,6 | + 0,2 | ± 0 | + 0,2 | ± 0 | - |
| 8 | 1,5 | 12,5 | - 0,1 | - 0,2 | ± 0 | - 0,1 | - 0,1 |
| 9 | 3,0 | 12,4 | - 0,1 | + 0,1 | + 0,8 | + 0,3 | + 0,2 |
| 10 | 3,0 | 12,6 | - 0,3 | + 0,1 | + 0,6 | ± 0 | + 0,1 |
| 11 | 0,5 | 12,0 | - 0,1 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,2 |
| 12 | 0,5 | 11,8 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 1,0 | 16,5 | + 1,1 | + 0,2 | + 0,1 | + 0,1 | ± 0 |
| 14 | 1,0 | 12,1 | + 0,03 | - 0,02 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 15 | 3,0 | 12,1 | + 0,04 | ± 0 | - 0,15 | ± 0 | ± 0 |
| 16 | 3,0 | 12,1 | + 0,05 | ± 0 | - 0,05 | - 0,03 | - 0,02 |
| 17 | 3,0 | 12,0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - 0,01 |
| 18 | 1,0 | 11,8 | + 0 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,1 | + 0,1 |
| 19 | 1,0 | 11,8 | ± 0 | - 0,05 | - 0,05 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 1,0 | 14,2 | + 0,5 | + 0,3 | + 0 | - 0,1 | - 0,1 |

Tab. X

| HCl | | | Δ λ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Dosis/ ml | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 1,5 | 14,1 | + 0,1 | + 0,05 | - 0,1 | - 0,1 | ± 0 |
| 22 | 1,0 | 14,0 | + 0,05 | ± 0 | -,0,2 | - 0,2 | - 0,05 |
| 23 | 1,0 | 12,6 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | - 0,1 | - 0,1 |
| 24 | 1,0 | 12,5 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 25 | 1,0 | 11,9 | + 0,4 | + 0,3 | + 0,2 | ± 0 | - 0,1 |
| 26 | 1,0 | 12,3 | - 0,05 | ± 0 | - 0,05 | - 0,05 | ± 0 |
| 27 | 1,0 | 12,3 | ± 0 | + 0,15 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 28 | 1,0 | 12,3 | + 0,2 | - 0,05 | - 0,05 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 1,0 | 12,2 | ± 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 30 | 1,0 | 12,2 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 1,0 | 12,2 | ± 0 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 1,0 | 12,7 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | + 0,05 | - 0,05 |
| 33 | 1,0 | 12,8 | - 0,05 | - 0,03 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 34 | 1,5 | 11,3 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 35 | 1,8 | 11,3 | + 0,05 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 36 | 1,0 | 16,3 | + 0,3 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 1,0 | 11,8 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 38 | 2,0 | 21,5 | ± 0 | - 0,6 | ± 0 | ± 0 | - |
| 39 | 2,0 | 15,9 | + 0,6 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 40 | 1,0 | 15,8 | + 0,3 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

Tab. XI

| HCl | | △ pH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 6,92 | - 0,01 | + 0,01 | + 0,045 | + 0,055 | + 0,05 |
| 2 | 6,97 | ± 0 | + 0,005 | ± 0 | + 0,005 | + 0,005 |
| 3 | 6,97 | ± 0 | + 0,025 | + 0,015 | + 0,02 | + 0,02 |
| 4 | 6,88 | + 0,005 | + 0,005 | - 0,01 | - 0,03 | - 0,02 |
| 5 | 7,28 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 6 | 7,27 | - 0,015 | ± 0 | - 0,005 | - | - |
| 7 | 7,26 | - 0,01 | + 0,01 | + 0,01 | + 0,02 | - |
| 8 | 7,34 | - 0,003 | - 0,038 | - 0,028 | + 0,018 | + 0,015 |
| 9 | 7,32 | + 0,01 | - 0,01 | - 0,02 | + 0,015 | + 0,01 |
| 10 | 7,33 | + 0,005 | - 0,02 | - 0,01 | + 0,02 | ± 0 |
| 11 | 6,91 | + 0,002 | + 0,012 | + 0,012 | + 0,022 | + 0,02 |
| 12 | 7,00 | - 0,006 | - 0,002 | - 0,002 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 7,51 | - 0,07 | + 0,01 | ± 0 | + 0,01 | ± 0 |
| 14 | 7,32 | - 0,05 | + 0,01 | + 0,01 | + 0,01 | + 0,01 |
| 15 | 7,32 | - 0,04 | - 0,02 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 16 | 7,18 | - 0,03 | ± 0 | + 0,005 | - 0,01 | - 0,02 |
| 17 | 7,18 | - 0,03 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | + 0,005 |
| 18 | 7,14 | ± 0 | + 0,008 | ± 0 | + 0,06 | + 0,005 |
| 19 | 7,14 | + 0,004 | + 0,006 | + 0,004 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 7,33 | - 0,03 | - 0,01 | + 0,01 | + 0,026 | + 0,025 |

Tab. XII

Tab. XIII

| HCl | | △ pH | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 7,35 | - 0,035 | - 0,025 | ± 0 | + 0,005 | + 0,01 |
| 22 | 7,37 | - 0,035 | - 0,02 | ± 0 | ± 0 | + 0,015 |
| 23 | 7,34 | - 0,025 | ± 0 | ± 0 | + 0,01 | + 0,01 |
| 24 | 7,34 | - 0,005 | ± 0 | + 0,004 | ± 0 | + 0,005 |
| 25 | 7,21 | - 0,015 | - 0,03 | + 0,02 | + 0,01 | + 0,01 |
| 26 | 7,19 | - 0,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 7,19 | - 0,045 | - 0,015 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 28 | 7,20 | - 0,035 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 7,23 | - 0,05 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 | ± 0 |
| 30 | 7,24 | - 0,04 | - 0,005 | - 0,005 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 7,26 | - 0,04 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 7,30 | - 0,01 | ± 0 | + 0,01 | + 0,008 | + 0,005 |
| 33 | 7,31 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | + 0,01 |
| 34 | 7,17 | - 0,02 | + 0,01 | ± 0 | + 0,01 | + 0,01 |
| 35 | 7,18 | - 0,03 | + 0,01 | + 0,005 | + 0,01 | + 0,01 |
| 36 | 7,19 | - 0,04 | - 0,005 | - 0,015 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 7,47 | - 0,005 | - 0,005 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 38 | 7,45 | ± 0 | + 0,01 | + 0,01 | + 0,01 | - |
| 39 | 7,52 | - 0,02 | ± 0 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 |
| 40 | 7,51 | - 0,015 | - 0,015 | - 0,03 | - 0,01 | ± 0 |

| HCl | | $\triangle P_{CO_2}$/Torr | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 58 | - 1 | - 1 | - 4 | - 6 | - 6 |
| 2 | 50 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 3 | 50 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 35 | ± 0 | ± 0 | + 1 | + 5 | + 5 |
| 5 | 29 | + 1 | - 1 | - 2 | - | - |
| 6 | 28 | + 1 | ± 0 | - 2 | - | - |
| 7 | 29 | + 2 | ± 0 | ± 0 | - 1 | - |
| 8 | 24 | - 0,5 | - 0,5 | + 0,5 | + 0,5 | + 0,5 |
| 9 | 23 | ± 0 | ± 0 | + 2 | - 1,5 | - 1 |
| 10 | 22 | ± 0 | + 1 | + 2 | - 2 | - 2 |
| 11 | 40 | ± 0 | + 1 | + 3 | + 3 | + 3 |
| 12 | 46 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 16 | + 1 | - 0,5 | ± 0 | + 1 | ± 0 |
| 14 | - | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - | - |
| 16 | - | - | - | - | - | - |
| 17 | - | - | - | - | - | - |
| 18 | 27 | + 2 | + 2 | + 3 | + 1 | + 1 |
| 19 | 32 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 52 | + 2 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

Tab. XIV

Tab. XV

| HCl | | $\triangle P_{CO_2}$/Torr | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 52 | + 2,5 | + 2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 22 | 53 | + 2,5 | + 2 | + 0,5 | ± 0 | - 1 |
| 23 | 30 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 24 | 30 | + 1,5 | + 1 | ± 0 | - 0,5 | - 1 |
| 25 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 24 | + 3 | + 1 | - 1 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 28 | + 3 | + 3 | + 2 | + 1 | ± 0 |
| 28 | 34 | + 1 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 35 | + 2 | + 1,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 30 | 37 | + 2 | + 1,5 | + 1 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 39 | + 1 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 34 | + 4 | + 1 | - 1 | ± 0 | ± 0 |
| 33 | 32 | + 5 | + 1 | + 1 | + 1 | ± 0 |
| 34 | 34 | + 2 | + 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 35 | 33 | + 2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 36 | 32 | + 1,5 | - 1,5 | - 1 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 25 | + 1,0 | + 0,5 | - 0,4 | - 0,4 | ± 0 |
| 38 | 30 | + 0,5 | - 0,5 | - 0,8 | ± 0 | - |
| 39 | 34 | + 0,5 | ± 0 | + 0,1 | + 0,3 | + 0,4 |
| 40 | 36 | + 0,5 | + 0,5 | + 0,5 | + 1 | ± 0 |

| HCl | | $\triangle CO_2$ endexsp./ % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 3,6 | + 0,3 | - 0,3 | - 0,6 | - 0,6 | - 0,6 |
| 2 | 3,0 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 3 | 3,0 | + 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 2,0 | - 0,1 | ± 0 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 |
| 5 | 2,0 | + 0,3 | - 0,2 | - 0,2 | - | - |
| 6 | 1,7 | + 0,4 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 7 | 2,0 | + 0,4 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 8 | 2,6 | ± 0 | + 1,0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 9 | 2,6 | ± 0 | + 0,6 | - 0,2 | - 0,1 | - 0,1 |
| 10 | 2,0 | ± 0 | + 1,0 | - 0,3 | ± 0 | ± 0 |
| 11 | 2,9 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 12 | 2,5 | + 0,5 | ± 0 | - 0,3 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 4,0 | + 0,7 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 14 | 3,0 | + 0,5 | - 0,1 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 15 | 3,0 | + 0,5 | ± 0 | - 0,5 | ± 0 | ± 0 |
| 16 | 2,7 | + 1,3 | - 0,2 | - 0,3 | ± 0 | ± 0 |
| 17 | 2,5 | + 0,7 | ± 0 | - 0,4 | - 0,3 | - 0,2 |
| 18 | 2,4 | + 0,2 | + 0,1 | ± 0 | + 0,5 | ± 0 |
| 19 | 2,8 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,1 | ± 0 |
| 20 | 5,1 | + 1,9 | ± 0 | ± 0 | - 0,2 | - 0,2 |

Tab. XVI

Tab. XVII

| HCl | | $\Delta CO_2$ endexsp./% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 5,0 | + 1,5 | + 0,5 | ± 0 | - 0,1 | ± 0 |
| 22 | 5,0 | + 1,1 | + 0,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 23 | 2,7 | + 0,8 | ± 0 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 24 | 2,7 | + 0,3 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 25 | 2,6 | + 1,4 | ± 0 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | - | - | - | - | - | - |
| 27 | - | - | - | - | - | - |
| 28 | - | - | - | - | - | - |
| 29 | - | - | - | - | - | - |
| 30 | - | - | - | - | - | - |
| 31 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | - | - | - | - | - | - |
| 34 | 3,2 | + 1,8 | - 0,2 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 35 | 3,0 | - 0,3 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 36 | 3,0 | + 1,0 | ± 0 | - 0,3 | - 0,3 | ± 0 |
| 37 | 2,1 | + 0,7 | - 0,3 | - 0,6 | - 0,1 | ± 0 |
| 38 | 3,8 | + 0,5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | - |
| 39 | 3,5 | + 0,7 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 40 | 3,8 | + 0,5 | - 0,1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

| HCl | | △ P / mm Hg | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 145 | + 5 | ± 0 | + 3 | + 5 | ± 0 |
| 2 | 150 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 3 | 150 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 155 | - 5 | - 5 | - 5 | - 10 | - 4 |
| 5 | 80 | + 10 | ± 0 | ± 0 | - | - |
| 6 | 80 | + 10 | ± 0 | + 5 | - | - |
| 7 | 85 | + 3 | ± 0 | + 8 | + 5 | - |
| 8 | 80 | - 12 | - 5 | - 10 | ± 0 | ± 0 |
| 9 | 70 | - 2 | ± 0 | + 3 | + 5 | ± 0 |
| 10 | 70 | ± 0 | + 5 | + 2 | ± 0 | ± 0 |
| 11 | 110 | - 5 | - 5 | ±0 | ± 0 | ± 0 |
| 12 | 110 | ± 0 | ± 0 | - 2 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 150 | - 10 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 14 | 95 | + 10 | ± 0 | - 5 | - 2 | + 1 |
| 15 | 90 | + 10 | + 10 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 16 | 80 | + 5 | + 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 17 | 80 | - 5 | - 2 | ± 0 | + 1 | + 2 |
| 18 | 110 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 19 | 115 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 102 | ± 0 | + 3 | - 5 | - 7 | ± 0 |

Tab. XVIII

Tab. XIX

| HCl | | $\triangle P$ / mm Hg | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 85 | ± 0 | + 3 | + 3 | + 10 | ± 0 |
| 22 | 95 | - 5 | ± 0 | - 5 | - 3 | ± 0 |
| 23 | 170 | ± 0 | ± 0 | + 5 | + 2 | ± 0 |
| 24 | 180 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 25 | 65 | - 15 | - 15 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 26 | 70 | - 8 | + 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 70 | - 8 | - 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 28 | 72 | - 4 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 68 | - 3 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 30 | 70 | - 8 | - 2 | - 2 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 70 | - 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 125 | - 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 33 | 125 | - 5 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | + 1 |
| 34 | 95 | - 2 | ± 0 | ± 0 | + 1 | + 1 |
| 35 | 92 | - 2 | + 4 | + 3 | + 2 | + 2 |
| 36 | 115 | + 2 | ± 0 | - 5 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 137 | ± 0 | ± 0 | - 10 | - 7 | - 2 |
| 38 | 140 | - 5 | ± 0 | + 1 | ± 0 | - |
| 39 | 145 | + 5 | + 3 | ± 0 | - 1 | ± 0 |
| 40 | 148 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

| HCl | | $\triangle HCO_3^-$ /mMol/l | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 11,15 | - 0,44 | + 0,06 | + 0,37 | + 0,20 | + 0,07 |
| 2 | 10,79 | ± 0 | + 0,12 | ± 0 | + 0,12 | + 0,12 |
| 3 | 10,79 | ± 0 | + 0,64 | + 0,38 | - 0,49 | - 0,49 |
| 4 | 6,14 | + 0,07 | + 0,07 | + 0,03 | + 0,41 | + 0,56 |
| 5 | 12,77 | + 0,14 | - 0,44 | - 0,88 | - | - |
| 6 | 12,05 | + 0,01 | ± 0 | - 0,98 | - | - |
| 7 | 12,2 | + 0,54 | + 0,28 | + 0,28 | + 0,13 | - |
| 8 | 12,14 | - 0,34 | + 1,25 | - 0,52 | + 0,78 | + 0,69 |
| 9 | 11,11 | + 0,26 | - 0,26 | + 0,42 | - 0,36 | - 0,24 |
| 10 | 10,87 | + 0,13 | - 0,02 | + 0,72 | - 0,52 | - 0,99 |
| 11 | 7,51 | + 0,04 | + 0,41 | + 0,8 | + 1,01 | + 0,95 |
| 12 | 10,63 | - 0,14 | - 0,05 | - 0,05 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 11,97 | - 1,15 | - 0,10 | ± 0 | + 1,05 | ± 0 |
| 14 | - | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - | - |
| 16 | - | - | - | - | - | - |
| 17 | - | - | - | - | - | - |
| 18 | 8,62 | + 0,64 | + 0,81 | + 0,95 | + 1,64 | + 0,42 |
| 19 | 10,21 | + 0,42 | + 0,14 | + 0,10 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 25,7 | - 0,8 | - 0,11 | + 0,6 | + 1,59 | + 1,53 |

Tab. XX

| HCl | | $\triangle HCO_3^-$ /mMol/l | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 26,91 | - 0,88 | - 0,52 | + 0 | + 0,32 | + 0,63 |
| 22 | 28,72 | - 0,96 | - 0,26 | + 0,27 | ± 0 | + 0,46 |
| 23 | 15,17 | - 0,37 | ± 0 | ± 0 | + 0,36 | + 0,36 |
| 24 | 15,17 | + 0,58 | + 0,5 | + 0,14 | - 0,25 | - 0,31 |
| 25 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 8,59 | + 0,23 | + 0,16 | + 0,35 | ± 0 | ± 0 |
| 27 | 10,03 | - 0,02 | + 0,69 | + 0,71 | + 0,35 | ± 0 |
| 28 | 12,46 | - 0,63 | + 0,07 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 13,75 | - 0,80 | + 0,26 | - 0,32 | - 0,32 | ± 0 |
| 30 | 14,87 | - 0,58 | + 0,41 | + 0,22 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 16,40 | - 1,05 | + 0,04 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 15,68 | + 1,44 | + 0,46 | - 0,11 | + 0,29 | + 0,19 |
| 33 | 15,10 | + 1,96 | + 0,47 | + 0,47 | + 0,47 | + 0,35 |
| 34 | 11,63 | + 0,13 | + 0,61 | ± 0 | + 0,27 | + 0,27 |
| 35 | 11,55 | - 0,12 | + 0,27 | + 0,13 | + 0,27 | + 0,27 |
| 36 | 11,46 | - 0,52 | -0,67 | - 0,74 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 17,06 | + 0,47 | + 0,13 | - 0,27 | - 0,27 | ± 0 |
| 38 | 19,55 | + 0,32 | + 0,12 | - 0,08 | + 0,45 | - |
| 39 | 26,03 | - 0,80 | ± 0 | - 0,52 | - 0,37 | - 0,29 |
| 40 | 26,93 | - 0,56 | - 0,56 | - 0,85 | + 0,12 | ± 0 |

Tab. XXI

| HCl | | $\Delta^{W}/\%$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 100 % | + 8,89 | + 1,27 | + 8,15 | + 10,34 | + 6,67 |
| 2 | 100 % | + 1,86 | + 2,5 | + 2,5 | + 2,5 | + 2,5 |
| 3 | 100 % | + 0,25 | + 0,63 | + 1,27 | + 1,27 | + 1,27 |
| 4 | 100 % | - 1,80 | - 1,80 | + 1,95 | - 0,69 | - 1,15 |
| 5 | 100 % | + 6,01 | ± 0 | - 2,0 | - | - |
| 6 | 100 % | + 6,13 | + 4,17 | + 6,25 | - | - |
| 7 | 100 % | - 0,45 | ± 0 | + 5,20 | + 5,88 | - |
| 8 | 100 % | - 4,38 | + 20,54 | - 12,5 | + 12,5 | + 12,5 |
| 9 | 100 % | + 11,02 | - 11,11 | - 47,86 | - 22,08 | - 20,0 |
| 10 | 100 % | + 42,86 | - 2,6 | - 35,71 | ± 0 | - 9,09 |
| 11 | 100 % | + 27,27 | + 90,91 | + 100,0 | + 100,0 | + 100,0 |
| 12 | 100 % | ± 0 | ± 0 | - 1,82 | ± 0 | ± 0 |
| 13 | 100 % | - 23,78 | - 3,92 | - 2,0 | - 2,0 | ± 0 |
| 14 | 100 % | + 4,27 | + 4,16 | - 5,26 | - 2,11 | + 1,05 |
| 15 | 100 % | + 2,88 | + 11,11 | + 42,86 | ± 0 | ± 0 |
| 16 | 100 % | - 3,41 | + 6,25 | + 11,11 | + 6,38 | + 4,17 |
| 17 | 100 % | - 6,25 | - 2,5 | ± 0 | + 1,25 | + 5,13 |
| 18 | 100 % | ± 0 | - 33,33 | - 33,33 | - 33,33 | - 33,33 |
| 19 | 100 % | ± 0 | + 33,33 | + 33,33 | ± 0 | ± 0 |
| 20 | 100 % | - 16,13 | - 7,71 | - 4,90 | - 3,14 | + 4,0 |

Tab. XXII

Tab. XXIII

| HCl | | △ W/ % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Ausg. Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 21 | 100 % | - 3,85 | + 1,5 | + 7,84 | + 16,42 | ± 0 |
| 22 | 100 % | - 7,2 | ± 0 | + 3,35 | + 5,65 | + 2,13 |
| 23 | 100 % | - 9,09 | ± 0 | + 2,94 | + 12,42 | + 11,11 |
| 24 | 100 % | - 5,26 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 25 | 100 % | - 67,03 | - 61,54 | - 40,0 | ± 0 | + 50,0 |
| 26 | 100 % | - 4,62 | ± 0 | + 7,69 | + 7,69 | ± 0 |
| 27 | 100 % | - 11,43 | - 23,53 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 28 | 100 % | - 26,54 | + 7,69 | + 7,69 | ± 0 | ± 0 |
| 29 | 100 % | - 18,07 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 30 | 100 % | - 18,24 | - 2,86 | - 2,86 | ± 0 | ± 0 |
| 31 | 100 % | - 7,14 | - 14,29 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |
| 32 | 100 % | - 4,0 | ± 0 | ± 0 | - 4,35 | + 4,76 |
| 33 | 100 % | + 0,17 | + 2,56 | + 9,09 | ± 0 | + 0,8 |
| 34 | 100 % | - 2,11 | ± 0 | ± 0 | + 1,05 | + 1,05 |
| 35 | 100 % | - 21,74 | + 4,35 | + 3,26 | + 2,17 | + 2,17 |
| 36 | 100 % | - 4,37 | - 2,08 | - 4,35 | ± 0 | ± 0 |
| 37 | 100 % | ± 0 | ± 0 | - 7,3 | - 5,11 | - 1,46 |
| 38 | 100 % | - 3,57 | + 6,45 | + 0,71 | ± 0 | - |
| 39 | 100 % | - 9,22 | + 2,07 | ± 0 | - 0,69 | ± 0 |
| 40 | 100 % | - 6,67 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

Tab. XXIV

| HCl 0,3 n | | $\triangle pH_{art.}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuch Nr. | Dosis | Ausg.-Wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
| 1 | 0,36 ml/kg | 7.17 | - 0,04 | - 0,04 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,01 |
| 2 | 0,36 ml/kg | 7.17 | - 0,04 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,01 | - 0,01 |
| 3 | 0,36 ml/kg | 7.36 | - 0,02 | - 0,01 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 |
| 4 | 0,36 ml/kg | 7.18 | - 0,03 | - 0,04 | - 0,02 | - 0,02 | ± 0 |
| 5 | 0,36 ml/kg | 7.18 | - 0,04 | - 0,03 | - 0,02 | - | - |
| 6 | 0,36 ml/kg | 7.35 | - 0,02 | - 0,02 | - 0,01 | ± 0 | ± 0 |
| Mittel-wert | 0,36 ml/kg | 7.24 | - 0,032 | - 0,028 | - 0,018 | - 0,01 | - 0,004 |

| HCl | Ausgangs-wert | 1 min | 2 min | 4 min | 8 min | 12 min |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta\lambda$ [cal·cm$^{-1}$·sec$^{-1}$·°C$^{-1}$] | 13,98 (± 2,78) | + 0,09 (± 0,04) | - 0,01 (± 0,02) | + 0,001 (± 0,20) | - 0,04 (± 0,13) | - 0,03 (± 0,11) |
| $\Delta$ pH | 7,24 (± 0,162) | - 0,02 (± 0,019) | - 0,0035 (± 0,013) | + 0,0006 (± 0,012) | + 0,0072 (± 0,016) | + 0,0056 (± 0,012) |
| $\Delta$ $pCO_2$ [mm Hg] | 34,66 (± 10,01) | + 1,29 (± 1,28) | + 0,52 (± 0,96) | + 0,13 (± 1,34) | + 0,073 (± 1,61) | - 0,035 (± 1,62) |
| $\Delta$ $CO_2$ end-exsp. % | 2,94 (± 0,86) | + 0,57 (± 0,56) | + 0,05 (± 0,31) | - 0,13 (± 0,19) | - 0,04 (± 0,17) | - 0,04 (± 0,12) |
| $\Delta$ p arteriell [mm Hg] | 106,1 (± 33,1) | - 1,35 (± 5,80) | - 0,15 (± 3,67) | - 0,4 (± 3,52) | + 0,03 (± 3,28) | + 0,03 (± 0,94) |
| $\Delta$ $HCO_3^-$ [mMol/l] | 14,335 (± 5,863) | - 0,079 (± 0,67) | + 0,142 (± 0,402) | + 0,046 (± 0,474) | + 0,22 (± 0,519) | + 0,147 (± 0,449) |
| $\Delta$ W % | | - 4,37 (± 15,94) | + 0,81 (± 20,25) | + 1,38 (± 22,65) | + 2,95 (± 18,16) | + 4,01 (± 19,96) |

Tab. XXV

Literaturverzeichnis

ADLER, S., A. ROY und A. S. RELMAN:
Intracellular acid-base regulation.
I. The response of muscle cells to changes in $CO_2$ tension or extracellular bicarbonate concentration.
J. clin. Invest. 44, 8 - 20 (1965)

ARNDT, H., H. BRINK, D. W. LÜBBERS und A. H. MAAS:
Untersuchungen zur Stabilität, Empfindlichkeit und Linearität der $P_{CO_2}$-Elektrode.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 288, 282 - 296 (1966)

BAUMGARTEN, E., E.KANZOW, H. P. KOEPENEN und F. TIMM:
Beitrag zur Technik der extra- und intracellulären sowie der stereotaktischen Mikroableitung im Gehirn.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 271, 245 - 256 (1960)

BERNSMEIER, A.: Probleme der Gehirndurchblutung.
Z. Kreisl.-Forsch. 48, 69 - 112 (1949)

BETZ, E.: Die lokale Gehirndurchblutung im akuten und chronischen Experiment.
Habil-Schrift, Marburg/Lahn (1965)

BETZ, E.: Zur Registrierung der lokalen Gehirndurchblutung mit Wärmeleitsonden.
Pflügers Arch. ges. Physiol. 284, 278 - 284 (1965)

BETZ, E. und D. HEUSER:
Die Wirkung von akuten Acidosen und Alkalosen des Blutes auf die cerebrale, corticale Durchblutung.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 291, R 51 (1966)

BETZ, E. und D. HEUSER:
Cerebral cortical blood flow during changes of Acid-Base equilibrium of the brain.
J. appl. Physiol. 23, 726 - 733 (1967)

BETZ, E. und R. KOZAK:
Der Einfluß der Wasserstoffionenkonzentration der Gehirnrinde auf die Regulation der corticalen Durchblutung.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 293, 50 - 67 (1967)

BETZ, E. und F.W. SCHMAHL:
Durchblutung und Sauerstoffdruck in der Gehirnrinde bei Carotisdrosselung und ihre Beeinflussung durch Pharmaka.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 287, 368 (1966)

BETZ, E. und R. WÜLLENWEBER:
Fortlaufende Registrierung der lokalen Gehirndurchblutung mit Wärmeleitsonden am Menschen.
Klin. Wschr. 40, 1056 (1962)

BETZ, E., R. KOZAK und A. HEREDIA:
Die Bedeutung des pH der Gehirnrinde für die Regulation der corticalen Durchblutung.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 289, R. 3 (1966)

BETZ, E., D.H. INGVAR, N.A. LASSEN und F.W. SCHMAHL:
Regional blood flow in the cerebral cortex, measured simultaneously by heat and inert gas clearance.
Acta physiol.Scand. 67, 1 - 9 (1966)

BOUCKAERT, J.J. und F. JOURDAN:
La circulation cérébrale.
J. Physiol. (Paris) 41, 69 - 112 (1949)

CLARC, L.C., R. WOLF, D. GRANGER und Z. TAYLOR:
Continuous recording of blood oxygen tension by Polarography.
J. appl. Physiol. 6, 189 - 193 (1953)

COURTICE, F.C.: The effect of oxygen lack on the cerebral circulation.
J. Physiol. (Lond.) 100, 198-211 (1941)

CRONE, Ch.: The Permeability of Brain Capillaries to Non-Electrolytes.
Acta physiol.scand. 64, 4o7 - 417 (1965)

DAVENPORT, H.W.: The ABC of Acid-Base Chemistry.
University of Chicago-Press (1958)

DE BERSAQUES,J., und J.R. LEUSEN:
Acid-base equilibrium between blood and cerebrospinal-fluid.
J. Physiol. (Lond.) 126, 14 (1954)

DOBBING, J.: The blood-brain barrier.
Physiol. Rev. 41, 130 - 138 (1961)

DUSSER DE BARENNE,J.G. und L.F. NIMS:
Changes in Hydrogen Ion Concentration of the cerebral cortex.
Proc.Soc.exp. Biol. (N.Y.), 36, 462 (1937)

DUSSER DE BARENNE, J.G., C.S. MARSHALL, W.S. McCULLOCH und L.F. NIMS:
Observations on the pH of the Arterial Blood, the pH and the Electrical Activity of the Cerebral Cortex.
Amer.J.Physiol. 124, 631 (1938)

ELLIOT, K.A.C. und H.H. JASPER:
Physiological salt solutions for brain surgery. Studies of local pH and pial vessel reactions to buffered and unbuffered isotonic solutions.
J. Neurosurg. 6, 140 (1949)

FAZEKAS, J.: Maximal dilatation of cerebral vessels.
Arch.Neurol. 11, 303 - 309 (1964)

FREYGANG, W.H. und L. SOKOLOFF:
Quantitative Measurements of Regional Circulation in the Central Nervous System by Use of Radioactive Inert Gas.
Advanc.biol.med.Phys. 6, 263 (1958)

GEIGER, A.: Correlation of brain metabolism and function by the use of brain perfusion method in situ.
Physiol.Rev. 38, 1 - 20 (1958)

GEIGER, A. und J. MAGNES:
Isolation of the cerebral circulation and the Perfusion of the Brain in the Living Cat.
Amer. J. Physiol. 149, 517 (1947)

GIBBS, F.A.: A thermoelectric blood flow recorder in the form of a needle.
Proc. Soc. exp. Biol. 31, 141 - 146 (1933)

GLASS, H.I., und A.M. HARPER:
The measurement of the partition coefficient of Krypton between brain cortex and blood by a double isotope method.
Phys. in Med. Biol. 7, 335 - 339 (1962)

GLEICHMANN, U., D.H. INGVAR, D.W.LÜBBERS, B.K. SIESJÖ und G. THEWS:
Tissue $P_{O_2}$ and $P_{CO_2}$ of the cerebral cortex related to blood gas tensions.
Acta physiol.scand. 55, 127 (1962)

GOLENHOFEN, K., H. HENSEL und G. HILDEBRANDT:
Durchblutungsmessungen mit Wärmeleitelementen in Forschung und Klinik.
Thieme-Verlag Stuttgart (1963)

GOTOH, F., Y. TAZAKI und J.S. MEYER:
Transport of gases through brain and their extravascular vasomotor action.
Exp. Neurol. 4, 48 (1961)

GOTTSTEIN, U.: Physiologie und Pathophysiologie des Hirnkreislaufs.
Med. Welt 15, 715 - 726 (1965)

GRAYSON, J.: Internal calorimetry in the determination of thermal conductivity and blood flow.
J. Physiol. 118, 54 (1952)

HARPER, A.M. und R.A. BELL:
The effect of metabolic acidosis and alcalosis on the blood flow through the cerebral cortex.
J. Neurol.Neurosurg.Psychiat. 26, 341 - 344 (1963)

HARPER, A.M. und H.I. GLASS:
Effect of alterations in the arterial carbon dioxide tension on the blood flow through the cerebral cortex at normal and low arterial blood pressure.
J. Neurol.Neurosurg.Psychiat. 28, 449 - 452 (1965)

HARPER, A.M., H.I. GLASS und M.M. GLOVER:
Measurement of blood flow in the cerebral cortex of dogs by the clearance of Krypton$^{85}$.
Scot.med.J. 6, 12 - 17 (1961)

HASTINGS, A.B. und J. SENDROY jr.:
The effect of variation in ionic strength on the apparent first and second dissociation of the carbonic acid.
J.Biol.chem. 65, 445 - 466 (1925)

HENSEL, H.: Fortlaufende Wärmeleitfähigkeits- und Durchblutungsmessung im Gewebe mit einer Differential-Calorimetersonde.
Ber.ges.Physiol. 162, 360 (1953/54)

HENSEL, H.: Meßkopf zur Durchblutungsregistrierung an Oberflächen.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 268, 604 - 606 (1958/59)

HOLMDAHL, M.H., G.G. HASSAM, G. NAHAS und M. VERSOKY:
Acid-base changes in the cerebrospinal fluid following rapid changes in the bicarbonate/carbonic acid ratio in the blood.
Ann.Acad.Sci. (N.Y.) 92, 520 - 527 (1961)

INGVAR, D.H.: Measurements of Regional Gaseous Metabolism and Blood flow in the Cerebral Cortex.
Regional Neurochem. (1961), ed. by S.S. KETY and J. ELKES. London, Pergamon Press

INGVAR, D.H. und N.A. LASSEN:
Regional blood flow of the cerebral cortex determined by Krypton$^{85}$.
Acta physiol.scand. 54, 325 - 338 (1962)

INGVAR, D.H. und J. RISBERG:
Increase of regional cerebral blood flow during mental effort in normals and in patients with focal brain disorders.
Exp. Brain Res. 3, 195 - 211 (1967)

INGVAR, D.H., B. SIESJÖ und C.H. HERTZ:
Measurement of tissue $P_{CO_2}$ in the brain.
Experientia (Basel) 15, 306 - 308 (1959)

KETY, S.S. und C.F. SCHMIDT:
The Determination of Cerebral Blood Flow in Man by the Use of Nitrous Oxide in Low concentration.
Amer. J. Physiol. 143, 53 (1945)

KETY, S.S. und C.F. SCHMIDT:
The nitrous oxide method for the quantitative determination of cerebral blood flow in man: Theory producere and normal values.
J. clin. Invest. 27, 476 - 483 (1948)

KETY, S.S., B.D. POLIS, C.S. NADLER und C.F. SCHMIDT:
The blood flow and oxygen consumption of the human brain in diabetic acidosis and coma.
J. clin. Invest. 27, 500 (1948)

KOZAK, R.: Regulation der Gehirndurchblutung bei Einwirkung von Kohlendioxyd.
Inaugural-Dissertation Marburg/Lahn (1968)

LAMBERTSEN, C.J., S.J.G. SEMPLE, M.G. SMYTH und R. GELFAND:
$H^+$ und $P_{CO_2}$ as chemical factors in respiratory and cerebral circulatory control.
J.appl. Physiol. 16, 473 - 484 (1961)

LASSEN, N.A.: Brain Extracellular pH: The Main Factor Controlling Cerebral Blood Flow.
Scand.J.clin.Lab.Invest. 22, (1968)

LASSEN, N.A.: Cerebral blood flow and oxygen consumption in man.
Physiol. Rev. 39, 183 (1959)

LASSEN, N.A. und D.H. INGVAR:
The blood flow of the cerebral cortex determined by radioactive Krypton$^{85}$.
Ber.ges.Physiol. 227, 66 (1961)

LENNOX, W.G. und E. L. GIBBS:
The blood flow in the brain and the leg of man and the changes by alterations of blood gases.
J. clin. Invest. 11, 1155 - 1177 (1932)

LEUSEN, I.R.: Aspects of the acid-base balance between blood and cerebrospinal fluid.
In: Cerebrospinal fluid and the regulation of ventilation,(ed. C. McC. BROOKS, F.F. KAO und B.B. LLOYD) Oxford: Blackwell Scientific Publications (1965)

LEUSEN, I.R.: Acid-base euqilibrium between blood and cerebrospinal fluid.
Amer.J.Physiol. 176, 513 - 516 (1954)

LUBIN, A.J. und J.C. PRICE:
Effect of alkalosis and acidosis on cortical electrical activity and blood flow.
J.Neurophysiol. 5, 261 - 268 (1942)

MERWARTH, C.R. und H.O. SIEKER:
Acid-Base Changes in Blood and Cerebrospinal Fluid during altered Ventilation.
J.appl.Physiol. 16, 1016 (1961)

MEYER, J.S., F. GOTOH und Y. TAZAKI:
Continuous Recording of Arterial $P_{O_2}$, $P_{CO_2}$, ph and $O_2$ Saturation in vivo.
J. appl. Physiol. 16, 896 (1961)

MITCHELL, R.A. und M.M. SINGER:
Respiration and cerebrospinal fluid pH in metabolic acidosis and alkalosis.
J.appl.Physiol. 20, 443 - 452 (1965)

MITCHELL, R.A., D.A. HERBERT und C.T. CARMAN:
Acid-base constants and temperature coefficients for cerebrospinal fluid.
J.appl.Physiol. 20, 27 - 30 (1965)

MITCHELL, R.A., H.H. LOESCHKE, W.H. MASSION und J.W. SEVERINGHAUS:
Respiratory responses mediated through superficial chemosensitive areas on the medulla.
J.appl.Physiol. 18, 523 (1963)

MITCHELL, R.A., C.T. CARMAN, J.W. SEVERINGHAUS, B.W. RICHARDSON, M.M. SINGER und S. SNIDER:
Stability of cerebrospinal fluid pH in chronic acid-base disturbances in blood.
J.appl. Physiol. 20, 443 - 452 (1965)

PICKERODT, V.: unveröffentlicht

POSNER, J.B., A.G. SWANSON und F. PLUM:
Acid-base balance in cerebrospinal fluid.
Arch.Neurol. 12, 479 - 496 (1965)

RAPETA, C.E. und H.D. GREEN:
Autoregulation of canine cerebral blood flow.
Circulat. Res. 15, 205 - 212 (1964)

RAPOPORT, S.I.: Cortical pH and the blood-brain barrier.
J.Physiol. (Lond.) 170, 238 - 249 (1964)

REINMUTH, O.M., P. SCHEINBERG und B. BOURNE:
The reactivity of the human cerebral vascular system in relation ship to cerebral blood flow and cerebral metabolism.
J.Amer.med.Ass. 188, 448 (1964)

REULEN, H.J. und W. BRENDEL:
Hydrodynamik, Elektrolyt- und Säurebasen-Haushalt im Liquor und Nervensystem.
Thieme Verlag, Stuttgart (1967)

ROBIN, E.D., R.D. WHALEY, C.H. CRUMP, A.C. BICKELMANN und D.M. TRAVIS:
Acid-Base Relations between Spinal Fluid and Arterial Blood with special reference to control of ventilation.
J.appl.Physiol. 13, 385 - 392 (1958)

ROENNEFAHRT, K.W.: Die pH-Messung mit Glaselektroden.
Chemie, Heft 9/10, 3-14 (1964)

ROOS, A.: Intracellular pH and intracellular buffering power of the cat brain.
In: Cerebrospinal Fluid and the Regulation of Ventilation, pp. 151 - 162
(Eds.: C. McC. BROOKS, F.F. KAO und B.B. LLOYD) Oxford: Blackwell Scientific Publications (1965)

ROY, C.S. und C.S. SHERRINGTON:
On the regulation of the Blood Supply of the brain.
J.Physiol. 11, 85 (1890)

SCHIEVE, J.F. und W.P. WILSON:
The Changes in Cerebral Vascular Tone in Experimental Metabolic Alkalosis and Acidosis.
J.clin.Invest. 31, 658 (1952)

SCHIEVE, J.F. und W.P. WILSON:
The changes in cerebral vascular resistance of man in experimental alkalosis and acidosis.
J.clin.Invest. 32, 33-38 (1953)

SCHMAHL, F.W., E. BETZ, E. DETTINGER und A.J. HOHORST:
Energiestoffwechsel der Großhirnrinde und Elektroencephalogramm bei Sauerstoffmangel.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 292, 46-59 (1966)

SCHOLANDER, P.F.: Analyzer for accurate estimation of respiratory gases in one half cubic centimeter samples.
J.biol.Chem. 167, 235 - 250 (1947)

SEILER, N.: Der Stoffwechsel im Zentralnervensystem.
Thieme Verlag, Stuttgart (1966)

SEVERINGHAUS, J.W., R. A. MITCHELL, B. W. RICHARDSON und M.M. SINGER:
Respiratory control at high altitude suggesting active transport regulation of CSF pH.
J.appl.Physiol. 18, 1155 - 1166 (1963)

SEVERINGHAUS, J.W., H. CHIODI, E.I. EGER, B. BRANDSTATER und Th.F. HORNBEIN:
Cerebral blood flow in man at high altitude. Role of cerebrospinal fluid pH in normalization of flow in chronic hypocapnia.
Circulat.Res. 19, 274 (1966)

SIESJÖ, B.K.: The relation between the bicarbonate concentration in blood plasma and in brain tissue.
Experientia (Basel) 20, 455 (1964)

SIESJÖ, B.K. und U. PONTÉN:
Acid-Base changes in the Brain in Non-respiratory Acidosis and Alkalosis.
Exp.Brain Res. 2, 176 - 190 (1966)

SKINHÖJ, E.: Regulation of cerebral blood flow as a single function of the interstitial pH in the brain: A hypothesis.
Acta neurol.scand. 42, 604 (1966)

SOKOLOFF, L.: Factors Regulating the Total and Regional Circulation of the Brain.
3. Conference on microcirculatory Physiology and Pathology 1956
Amer.Physiol.Soc. (1958)

SOKOLOFF, L. und S.S. KETY:
Regulation of Cerebral Circulation.
Physiol.Rev. 40 (Suppl. 4) (196o)

STOW, R.W. und B.F. RANDALL:
Electrical Measurement of the $CO_2$ of Blood.
Amer. J. Physiol. 179, 678 (1954)

VARENBERG,von,P.: L'influence d'infusions intraveneuses d'acide lactique sur le liquide cephalo-ractidien sous normo et hyperthermie.
Arch.int. Pharmacodyn. 144, 592 - 595 (1963)

WINTERS, R.W. und B.B. DELL:
Regulation of acid-base equilibrium in Physiological Controls and Regulations.
In: W.B. SAUNDERS Comp. 181 - 238
Philadelphia and London (1965)

WYKE, B.: Brain functions and metabolic disorders.
London BUTTERWORKS (1963)

ZIERLER, K.L.: Two equations for measuring blood flow by external monitoring of radioisotopes.
Circulation Res. 16, 309 - 321 (1965)

# N a c h w o r t

Herrn Professor Dr. med. E. BETZ danke ich für die freundliche Überlassung des Themas, für die guten Arbeitsmöglichkeiten und für seine großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Herrn Professor Dr. med. H. HENSEL danke ich dafür, daß ich im Physiologischen Institut der Philipps-Universität Marburg einen Teil der Experimente durchführen konnte.

Die Arbeit wurde finanziell durch eine Spende der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglicht.

Lebenslauf
==========

Am 18. September 1943 wurde ich, Dieter Heuser, als zweites Kind des Stadtoberapothekers Dr. Otto Heuser und dessen Ehefrau Hertha Heuser geb. Brand in Kassel geboren. von 1950 bis 1954 besuchte ich die Dorothea-Viehmann-Schule in Kassel-Niederzwehren und weitere neun Jahre die Wilhelmschule in Kassel-Wilhelmshöhe, die ich 1963 mit dem Reifezeugnis verließ.
Im Sommersemester 1963 begann ich das Medizinstudium an der Philipps-Universität in Marburg. Im gleichen Jahr starb mein Vater, der erst 1950 aus russischer Gefangenschaft heimgekehrt war. 1964 bestand ich die naturwissenschaftliche, 1965 die ärztliche Vorprüfung. Von Juli 1966 bis Februar 1968 arbeitete ich als wissenschaftliche Hilfskraft unter Leitung von Herrn Professor Dr. med. E. Betz im Physiologischen Institut der Philipps-Universität, Marburg. Am 16. Januar 1969 bestand ich das medizinische Staatsexamen.

Fotodruck von Erich Mauersberger in Marburg